



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

**Ekonomická efektivnost přečerpávacích vodních
elektráren od roku 2022**

**Economic efficiency of Pumped Storage Power Plants from
2022**

Bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, Energetika a management

Studijní obor: Elektrotechnika a management

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Vítek, CSc.

František Šíla

Praha 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šíla** Jméno: **František** Osobní číslo: **502398**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektrotechnika a management**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Ekonomická efektivnost přečerpávacích vodních elektráren od roku 2022

Název bakalářské práce anglicky:

Economic efficiency of pumped storage power plants from 2022

Pokyny pro vypracování:

Účel a funkce PVE v elektrizační soustavě (statické a dynamické služby)
Model pro stanovení tržeb PVE
Odhad investičních a provozních nákladů
Výpočet ekonomické efektivnosti PVE ve vybrané lokalitě

Seznam doporučené literatury:

KISLINGEROVÁ, Eva. Manažerské finance. 2., přeprac. a dopl. vyd. V Praze: C.H. Beck, 2007. Beckova edice ekonomie. ISBN 978-80-7179-712-8
ŠŤASTNÝ, Jiří. Energetická strojní zařízení. Vyd. 1. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-010-3585-9.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Miroslav Vítek, CSc. 13116

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **30.01.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **21.09.2025**

Ing. Miroslav Vítek, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Anotace

Bakalářská práce se zabývá ekonomickou efektivností práce přečerpávacích elektráren v elektrizační soustavě. Je popsán aktuální stav energetické sítě v ČR a je nastíněn její možný budoucí vývoj. Dále je popsán princip funkce přečerpávacích elektráren a jejich využití v rámci elektrizační soustavy. V práci je popsán princip statických a dynamických služeb. Dále je na základě denního trhu zkoumán zisk (resp. obchodní rozpětí) z provozu přečerpávací elektrárny pro několik různých scénářů funkce a je porovnán s hypotetickými náklady na výstavbu a provoz. Důsledkem je pak zhodnocení ekonomické efektivnosti přečerpávací elektrárny v dané lokalitě.

Klíčová slova

Přečerpávací vodní elektrárna, denní trh, akumulace, elektrická energie, elektrizační soustava, obnovitelné zdroje energie, statické služby, dynamické služby, ekonomická efektivita, výkon, náklady

Annotation

This bachelor thesis examines the economic efficiency of pumped-storage power plants in the power grid. It describes the current state of the energy network in the Czech Republic and outlines its potential future development. Furthermore, it explains the principle of operation of the pumped-storage power plants and their utilization within the power grid. The thesis also covers the principles of static and dynamic services. Moreover, it investigates the profit (or trading spread) from the operation of pumped-storage power plant based on daily market conditions for several different function scenarios, comparing it with the hypothetical construction and operating costs. As a result, it evaluates the economic efficiency of the pumped-storage power plant in given location.

Key words

Pumped storage power plant, daily market, accumulation, electrical energy, power grid, renewable energy sources, static services, dynamic services, economic efficiency, capacity, costs

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....

František Šíla

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu Ing. Miroslavu Vítkovi CSc. za cenné rady, trpělivost a čas věnovaný konzultacím při vypracování této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a všem, kteří mě podporovali v dosavadním studiu

Obsah

Úvod	8
1. Přehled PVE v ČR	10
1.1 Historie	10
1.2 Současnost.....	10
1.2.1 Štěchovice II	10
1.2.2 Dalešice	11
1.2.3 Dlouhé stráně	11
1.3 Budoucnost.....	12
2. PVE ve světě	15
2.1 Historie	15
2.2 Přehled PVE ve světě	16
3. Stav energetické sítě v ČR a v Evropě	20
3.1 Bilance a možný vývoj energetického mixu v ČR.....	20
3.2 Evropská energetika	24
4. Akumulace a funkce PVE	26
4.1 Možné způsoby akumulace energie	26
4.2 Akumulace energie v PVE a její funkce.....	30
4.3 Statické služby	32
4.4 Dynamické služby	33
5. Výpočet marže	35
5.1 Popis teoretické PVE.....	35
5.2 Zkoumané scénáře	36
5.3 Porovnání marží scénářů	37
6. Náklady	38
6.1 Investiční náklady	38
6.2 Provozní náklady.....	38
7. Vyhodnocení ekonomické efektivity	40
8. Závěr	43
Seznam použité literatury	44

Úvod

Elektrická energie je v dnešní době nejvíce používaná forma energie. Hlavním důvodem je jednoduchá přeměna jiných forem energie na energii elektrickou a obráceně. Elektrickou energii jsme se jako lidstvo naučilo velmi efektivně využívat ve všech odvětvích. Elektrickou energii lze velmi snadno transportovat i na velké vzdálenosti. Po celou historii využívání elektrické energie byl jediným záporům nedostatek velkokapacitních metod její akumulace.

Akumulace jakékoliv formy energie je nutná pro její efektivní využívání. Historicky nebyla akumulace elektrické energie tak tíživým problémem jako dnes vzhledem k tomu, že byly využívány hlavně uhelné, plynové a jaderné elektrárny, jejichž výkon lze řídit dle aktuální poptávky bez ohledu na počasí. V České republice je to dáno hlavně dostupnými zdroji energie. Máme k dispozici velké zásoby uhlí, a proto jsou u nás dominantním zdrojem energie tepelné elektrárny. S rozvojem obnovitelných zdrojů energie čelíme novému problému. Tímto problémem je nestabilita dodávek energie z obnovitelných zdrojů. Efektivní akumulace energie tady stále nabírá na důležitosti a je potřeba mít k dispozici zdroje, které mohou výkyvy v síti regulovat a uvádět do souladu s aktuální poptávkou. Dnes je vyvíjena řada nových technologií, které by mohly situaci vyřešit, nicméně dominantním akumulátorem energie v ČR jsou stále přečerpávací elektrárny.

První přečerpávací vodní elektrárna Černé jezero byla spuštěna v roce 1930 nedaleko Hojsovy Stráže a fungovala do roku 1960. Dnes jsou v ČR tři provozované přečerpávací vodní elektrárny (dále PVE). První z nich je PVE Štěchovice II, jejíž výstavba začala za 2. světové války a byla dokončena v roce 1947 a má instalovaný výkon 45 MW, druhá je PVE Dalešice s instalovaným výkonem 450 MW a třetí z nich je asi známější PVE Dlouhé stráně s výkonem 600 MW. Přečerpávací elektrárny jsou dnes využívány stále více. Mezi lety 2009 a 2020 se jejich využívání prakticky zdvojnásobilo. Již nyní existuje několik projektů na výstavbu nových přečerpávacích elektráren jako například Lipno I – Vyšší Brod, Lipno III, Kyjice nebo Vinice-Pteč

Z již existujících PVE je známo, že jejich výstavba je opravdu složitá. Investiční náklady na výstavbu PVE Dlouhé stráně se vyšplhaly až na 6,5 miliardy Kč v nominální hodnotě. Při dnešních cenách by výstavba podobného projektu vyšla na zhruba 13,5 miliard Kč. Dalším výdajem by určitě byl rozvoj přenosové soustavy v okolí nové PVE. Je tedy jasné, že náklady na výstavbu se pohybují ve velmi vysokých částkách, a proto je ekonomická

efektivnost velmi důležitým faktorem pro to, aby vůbec mělo smysl takovýto projekt zrealizovat.

Tato práce bude zkoumat ekonomickou efektivnost teoretické přečerpávací elektrárny Vinice-Pteč, jejíž výstavba se velmi rychle blíží realizaci. Elektrárna by podle plánu Ministerstva životního prostředí výkon 440 MW a kapacitu horní nádrže 4,4 milionů m³ vody.

1. Přehled PVE v ČR

1.1 Historie

Podle [12] a [21] historie PVE v České republice sahá až do roku 1930, kdy byla postavena první PVE Černé jezero. Elektrárna byla postavena v rámci elektrifikace Československa, která probíhala až do roku 1939. První počátky výstavby začaly v roce 1929 a elektrárna byla uvedena do provozu 6. prosince 1930. Elektrárna je vybavena Peltonovou turbínou o výkonu 1500 kW a motorgenerátorem Škoda o výkonu 1750 kW během čerpání. Spodní nádrž elektrárny se nachází na řece Úhlavě a jako horní nádrž slouží Černé jezero. Obě nádrže byly spojeny potrubním systémem. Spád PVE je 247,7 m a hltnost turbíny je 0,8 m³/s. Dolní nádrž umožňovala čerpání 10 hodin denně a výrobu elektřiny 5 hodin denně. Od roku 1960 je provoz omezen. V roce 2004 a 2005 byla elektrárna vybavena dvěma novými turbogenerátory o celkovém výkonu 410 kW. Tyto generátory byly zavedeny za účelem využití odtoku vody z vyrovnávací nádrže. Za povšimnutí stojí fakt, že hladina Černého jezera při provozu PVE kolísala pouze od 4 cm, čímž se zachoval přírodní ráz jezera.

Druhá PVE Pastviny byla podle [13] uvedena do provozu v roce 1938. V té době se jednalo o největší přečerpávací elektrárnu v Československu. Elektrárna byla postupně převedena na průtočnou vodní elektrárnu. Poslední použití soustrojí v čerpadlovém režimu proběhlo 9.3.1964. Elektrárna od té doby stále funguje, a dokonce v roce 2000-2003 prošla modernizací. Momentálně je vybavena středotlakou Francisovou turbínou s instalovaným výkonem 3000 kW.

1.2 Současnost

1.2.1 Štěchovice II

První skutečně velkou PVE je elektrárna Štěchovice II. Dle [21],[37] se původně mělo jednat pouze o průtočnou vodní elektrárnu. Výstavba začala v roce 1938. Během německé okupace byla nejdříve stavba zastavena. Během druhé světové války se na elektrárně začalo opět postupně pracovat, z důvodu poškození, či zničení ostatních vodních elektráren v Německu nebo jím okupovaných zemí, a byla rozšířena o PVE Štěchovice II. Dodnes jsou vedeny spory o účelu tohoto rozšíření (podle [16]), neboť výstavba a provoz PVE jsou během válečného stavu nadbytečné – většina továren pracovala v třísměnném režimu a nekolísala tedy poptávka po energii. Elektrárna byla následně v roce 1947 uvedena do provozu. Byla vybavena dvěma soustrojí o výkonu 21 MW. Horní nádrž se nachází na přilehlém kopci Homole a má

objem 500 000 m³. Spád je až 220 metrů. V roce 1991 musela být elektrárna vyřazena z provozu pro zastaralost. Elektrárna prošla rekonstrukcí mezi lety 1992-1996, kdy byla soustrojí vyměněna za jednu reverzní Francisovu turbínu o výkonu 45 MW s hltností vody 24,3 m³/s.

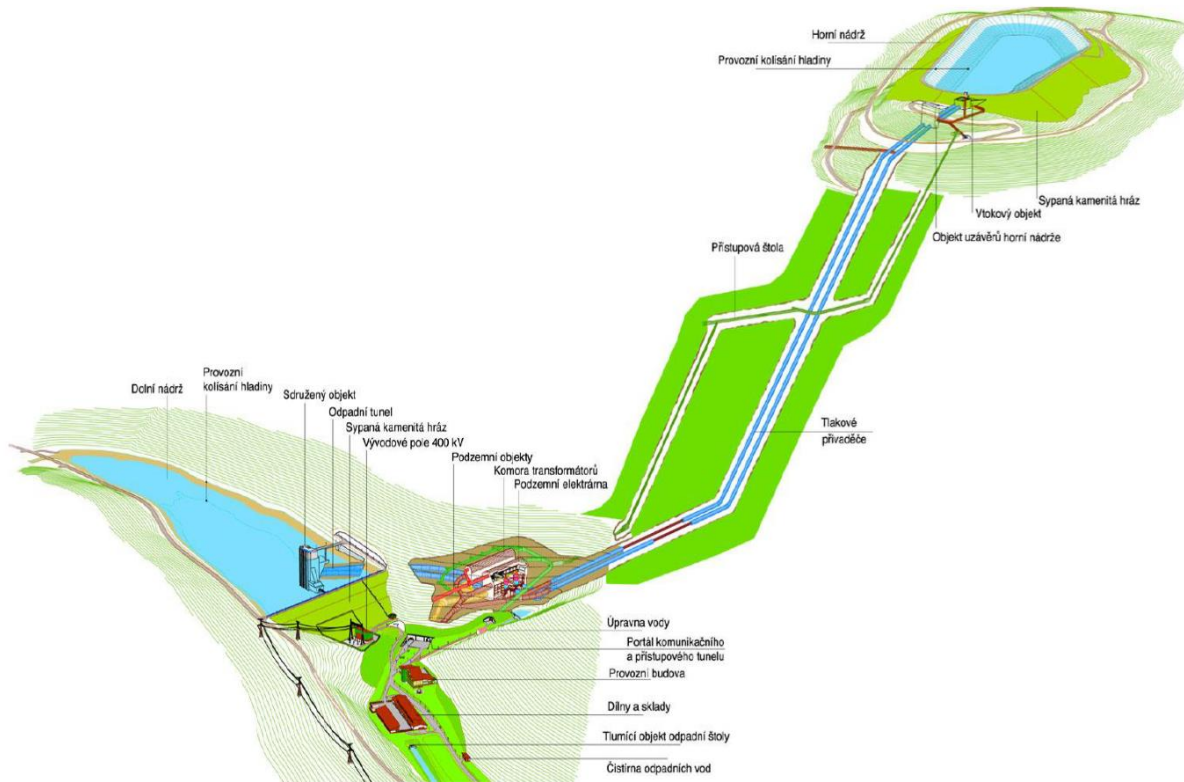
1.2.2 Dalešice

PVE Dalešice byla budována společně s jadernou elektrárnou Dukovany. Byla uvedena do provozu v roce 1978. V době její výstavby se jednalo o největší přečerpávací elektrárnu v tehdejší Československu. Horní nádrž Dalešice má podle [21] objem 127 milionů m³ vody a dolní nádrž je nádrž Mohelno. Nádrž Dalešice zároveň slouží jako zdroj technologické vody pro Dukovany a dlouhodobě vyrovnává průtok řeky Jihlavy. Také zvyšuje kvalitu vody tím, že filtruje odpadní vody z jaderné elektrárny. Vzhledem k jejímu velkému objemu je již tato elektrárna využívána během špiček výroby a spotřeby energie a hraje tak nezastupitelnou roli v stabilizaci rozvodné sítě. Rychlost najetí je 55 s na plný výkon (nejrychlejší v ČR) a elektrárna je plně automatizována a ovládána z dispečinku v Praze. Spád je 90 metrů a elektrárna je vybavena čtyřmi reverzními Francisovými turbínami o celkovém výkonu 475 MW. K výrobě energie slouží 4 synchronní generátory s obousměrným točením a napětím 13,8 kV. Výkon elektrárny je stejně velký jako výkon jednoho bloku elektrárny Dukovany. Zajímavostí je hráz, která není z železobetonu, ale jedná se o sypanou hráz s výškou 100 m.

1.2.3 Dlouhé stráně

PVE Dlouhé stráně je nejznámější a největší PVE v ČR. Stavba elektrárny byla započata v roce 1978, avšak na počátku 80. let byla stavba prakticky zastavena. V roce 1985 byl celý projekt modernizován a stavba byla následně znovu započata v roce 1989. Elektrárna pak byla po více než 17 letech stavby uvedena v roce 1996. Jednou z komplikací během výstavby bylo umístění elektrárny v chráněné krajinné oblasti, a proto se jednalo o velmi kontroverzní projekt. Elektrárna je v ČR na prvním místě hned v několika kategoriích. Má instalovaný výkon 650 MW, který je poskytován dvěma reverzními Francisovými turbínami a jedná se o největší instalovaný výkon na jakémkoli vodním díle v ČR. Hltnost turbín je podle [15], [21] 68,5 m³/s. Objem horní nádrže je 2,7 milionu m³, což je nejvíce ze všech PVE v ČR a má také největší spád, který je 510,7 metrů. Horní nádrž se nachází na „uříznutém“ vrcholu hory dlouhé stráně. Dolní nádrž má kapacitu 3,4 milionu m³ a nachází se na řece Divoká Desná. Obě nádrže jsou spojeny dvěma převaděči o délkách 1547 a 1499 metrů. Pro krytí vlastní spotřeby využívá elektrárna malou nízkotlakou vyrovnávací elektrárnu Dlouhé Stráně II s instalovaným výkonem 163 kW. Jedná se o velice výjimečný projekt, protože se při jeho výstavbě kladl velký

důraz na ekologii a omezení zásahu do krajiny. Zásah do krajiny byl omezen tak, že je veškerý provoz elektrárny v podzemí. Za tuto snahu dostala elektrárna několik ocenění jako jedna z nejekologičtějších energetických staveb v Evropě



Obrázek 1: PVE Dlouhé Stráně [14]

1.3 Budoucnost

Na českých řekách již není prostor vhodný pro výstavbu dalších přehrad pro průtočné, či jezové vodní elektrárny. Z těchto důvodů se začíná uvažovat konverze některých stávajících vodních elektráren na PVE. Další důvody pro volbu této cesty jsou ekonomické. Výstavba zcela nové PVE je několikamiliardový projekt a je mnohem levnější konvertovat existující vodní díla na PVE. Existuje hned několik projektů, které by se mohly uskutečnit. Tato práce se bude zabývat těmi nejaktuálnějšími.

Dalším velice zajímavým projektem je podle [26] PVE Dunaj – Vltava. Tento projekt by měl propojit vodní nádrže Lipno a Jochenstein. Lipno by mělo sloužit jako horní nádrž a Jochenstein jako nádrž spodní. PVE by měla vyrábět elektřinu v období hrozících povodní, kdy má vodní nádrž Lipno vysokou hladinu. Čerpání by probíhalo, když je ve Vltavě nedostatek vody a Dunaj je zásobován tajícími ledovci. Výrobu elektřiny by měly zajišťovat čtyři reverzní

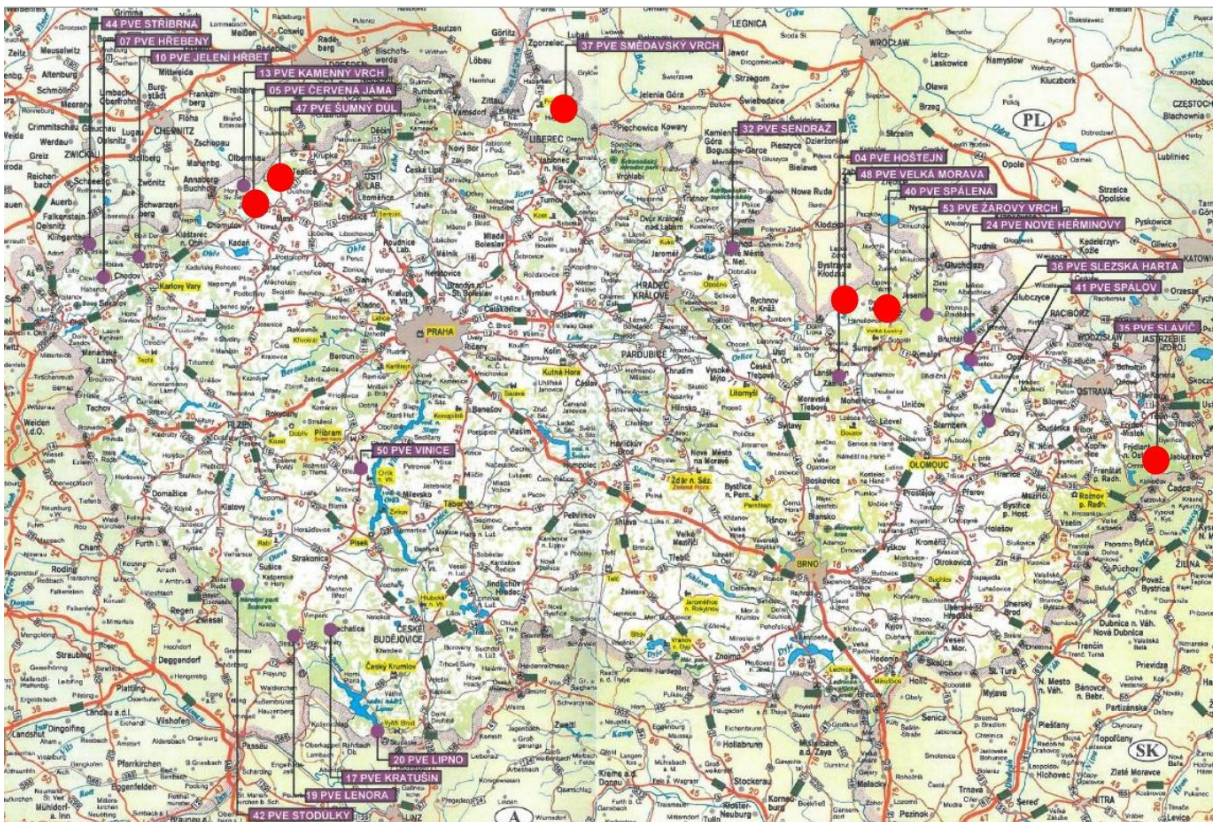
Francisovy turbíny o celkovém výkonu 1000 MW, který by mohl být v nouzové situaci i vyšší. Tento výkon zhruba odpovídá výkonu jednoho bloku v jaderné elektrárně Temelín.

Velmi často zmiňovanou variantou je podle [45] využití zatopeného dolu, jako nádrž pro PVE. Již na první pohled se jedná o velice logický návrh. Není potřeba vynakládat úsilí na větší výkopové práce a již přítomná důlní technika by případné úpravy povrchu výrazně usnadnila. Další výhodou je, že není třeba výrazněji řešit ekologický aspekt. Častým úskalím bývá obava o přílišný zásah do krajiny. Vzhledem k tomu, že by se jednalo o zatopený hlubinný důl, sou obavy o přílišný zásah do krajiny poněkud nevěcné. Pozitivem je také velký spád, který by mohl dosahovat i zhruba 580 metrů. Alternativní variantou je využití povrchového hnědouhelného lomu. V tomto případě by byla spád výrazně menší, ale objem vody v nádržích výrazně větší. Sice je možnost využití starých lomů či dolů jako PVE často skloňována, nicméně nikdy k realizaci projektu, který by se velikostí blížil ostatním českým PVE. Na ostravsku byla postavena v nevyužívané důlní šachtě malá PVE. Instalovaný výkon činí 650 kW a nachází se asi 600 metrů pod zemí [69]. K realizaci projektu o podobném výkonu jako ostatní PVE v ČR nedošlo, buď že se dostupné prostředky využily na jiný energetický projekt, nebo z důvodů velkých obav ekologů a ochránců přírody anebo místních obyvatel.

Aktuálním adeptem na novou PVE je podle [17] Orlická přehrada. Aktuální Kaplanovy turbíny již dosluhují a jejich výměna bude brzy nutná. Plán projektu zahrnuje zbudování PVE mezi vodními nádržemi Kamýk a vodní nádrže Orlík. Kamýk by sloužil jako akumulční nádrž a Orlík jako zdroj vody nádrž. Dvě ze čtyř turbín v Orlické přehradě by byly nahrazeny reverzními Francisovými turbínami a zbylé dvě standardními Francisovými turbínami pro jednosměrný provoz. Projekt je výhodný i pro to, že při jeho realizaci by došlo k minimálnímu zásahu do krajiny. Celý projekt je na velmi dobré cestě k realizaci. Majitel a správce vodních děl Povodí Vltavy již dalo souhlas k celému projektu a do konce roku by měl projekt projít výběrovým řízením. Jediným významnějším problémem je nízká kapacita Kamýku. Nejedná se však o jediný projekt, který by využil Orlickou přehradu jako nádrž pro nové PVE.

Ministerstvo životního prostředí (dále MŽP) a Ministerstvo zemědělství pracují dle [43] s podobným plánem v celkem šesti lokalitách. Jednou z nich je projekt PVE Vinice – Pteč, situovaný právě u Orlické přehrady. Pro právě tento projekt budu provádět analýzu ekonomické efektivity. Mezi další lokality patří Slapy, Pastviny, Libochovany, Vinice a Slezská Harta. Snahou je tedy využívat především existující vodní nádrže, tím se výrazně sníží investiční náklady a také zásah do krajiny a celkový ekologický dopad. Nejedná se o zcela nový projekt. Seznam potenciálních míst pro výstavbu PVE vychází i ze starší studie MŽP z roku 2010. Na

tomto novém průzkumu se také podílela Povodí Vltavy a Povodí Labe. Celkově se jedná o velmi rozsáhlý plán. Výsledný potenciální instalovaný výkon všech šesti vodních děl je 1222 MW, což je zhruba stejný instalovaný výkon, kterým disponují všechny v současné době existující PVE v ČR. Tato snaha, vedená především Povodím Vltavy, o rozšíření výroby a akumulace energie pomocí našich vodních zdrojů zahrnuje i výstavbu nových malých vodních elektráren. Nejnovější z nich je vodní elektrárna v Klecanech. Výstavba tohoto vodního díla začala 1. března. Celkovým cílem je jednak lepší využití energetického potenciálu České republiky a také dosažení lepší energetické a tím i politické soběstačnosti.



Obrázek 2: Potenciální lokality pro PVE ze studie v Roce 2010 [46]

2. PVE ve světě

2.1 Historie

Využívání vody jako zdroje energie je součástí lidské energie již po mnoho staletí. Vodní mlýny byly dle [50] využívány už od 10. století. Od té doby se využívání vody jako zdroje energie dále rozšiřovalo. Elektřina vyrobená pomocí vodních elektráren byla významnou součástí výroby elektrické energie od 80. let 19. století. Využívání vody na ukládání elektrické energie přišlo až později.

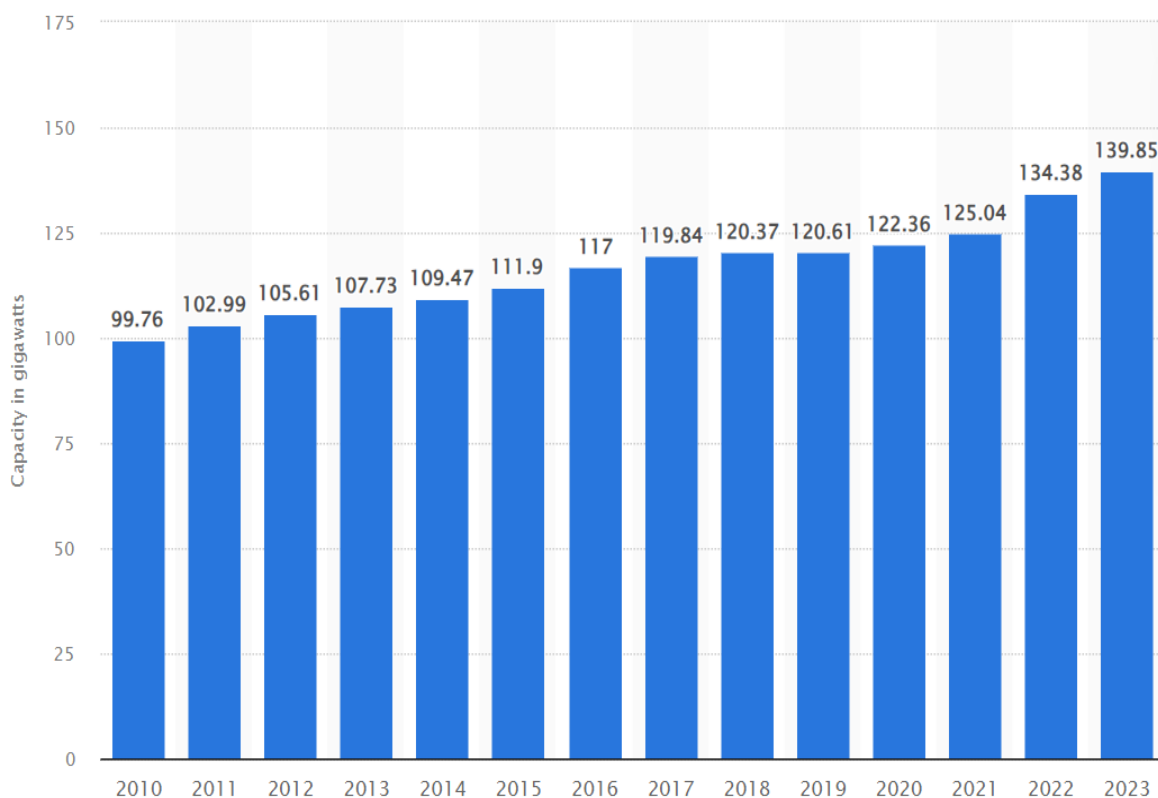
První PVE na světě byla uvedena do provozu v roce 1909 ve švýcarském Schaffhausenu a pracuje dodnes. Elektrárna byla vybavena pumpou a turbínou, které byly vzájemně odděleny, jak tvrdí [53]. Protože v době její konstrukce ještě nebyly dle [54] známy reverzní turbíny. Elektrárna proběhla na počátku 90. let minulého století rekonstrukcí a měla by pracovat alespoň do roku 2052.

První významnější PVE byla spuštěna v roce 1929 v USA. Rocky River Plant byla prvním dílem svého druhu ve Spojených Státech. Stavba byla zahájena v roce 1926. Důvody k její výstavbě nebyly čistě energetické. Dle [55] byla elektrárna postavena za účelem regulování průtoky řeky Rocky River a tím i regulovat tok Housatonic River. Elektrárna byla podle [56] vybavena dvěma Francisovými turbínami o průtoku zhruba 7 kubických metrů vody za sekundu a měla celkový výkon 29 MW. Jezero Candlewood slouží jako horní nádrž, která má objem zhruba 5,9 miliardy čtverečních mil neboli zhruba 15 miliard kubických metrů vody. Jako dolní nádrž slouží řeka Rocky River. Značnou nevýhodou byla nízká účinnost, která se dle [55] pohybovala kolem 61 procent. Tento problém byl viditelný hned po uvedení do provozu, a proto došlo v roce 1951 k rekonstrukci. Po úpravách byl výkon elektrárny zvýšen na 31 MW.

V roce 1956 došlo k významnému průlomu v technologii PVE. V americkém státě Tennessee byla spuštěna první reverzní turbína. Díky tomuto vynálezu byla významně zvýšena účinnost PVE, a tedy vzrostl i zájem od jejich výstavbu. K dalšímu významnějšímu rozvoji docházelo mezi 60. a 80. lety minulého století, zejména kvůli energetické krizi v 70. letech.

V dnešní době jsou PVE relativně běžnou součástí energetické sítě velkého množství zemí světa. Důkazem je fakt, že dle [51] jsou PVE zodpovědné za zhruba 96 procent veškerého světového instalovaného výkonu v akumulačních zařízeních. Celkový výkon všech PVE na světě je zhruba 140 GW. Do budoucna je obtížné odhadovat, jak se tento podíl bude vyvíjet. Stále dochází k dalšímu rozvoji i jiných metod akumulace energie – zejména baterií, nicméně

stále neexistuje efektivní způsob ukládání velkého množství energie, který by byl účinnější než PVE a lze tak bezpečně očekávat jejich další rozvoj. Na obrázku 3 je vidět vývoj celosvětového instalovaného výkonu v PVE mezi lety 2010 a 2023. Jasně je zde vidět dlouhodobý rozvoj PVE



celosvětově.

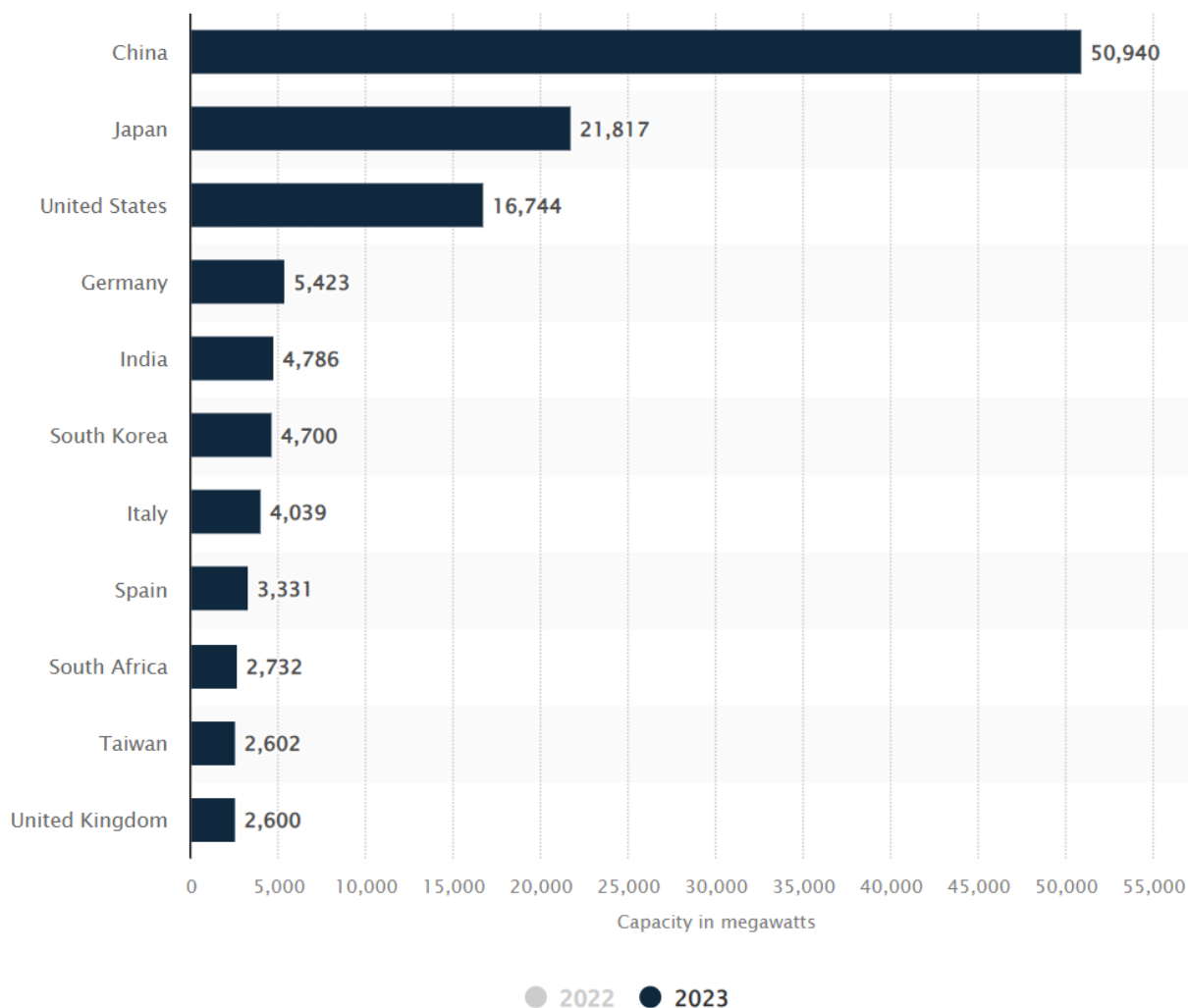
Obrázek 3: Celosvětová kapacita v PVE [57]

Za povšimnutí stojí větší skok v kapacitě mezi lety 2021 a 2022. Je způsobený politickou situací na Ukrajině a tím způsobenou potřebou po efektivním a velkokapacitním způsobu ukládání elektrické energie. Je vhodné zmínit, že nebyly z ničeho nic spuštěny nové PVE, protože jejich výstavba trvá obvykle přes 10 let. Jedná se o znovuotevření starších PVE anebo o jejich rekonstrukci, která vedla ke zvýšení kapacity. Také započalo plánování nebo i stavby nových projektů například v ČR, jak je zmíněno výše. Lze tedy očekávat, že instalovaný výkon PVE bude nadále růst.

2.2 Přehled PVE ve světě

Celosvětovým lídrem v kapacitě PVE je Čína. Čína ve velké míře využívá sílu svých vodních toků a má dle [51] největší instalovaný výkon vodních elektráren na světě a také

největší vodní elektrárna na světě – Tři Soutěsky. Toto se odráží i v kapacitě přečerpávacích elektráren. Instalovaný výkon PVE v Číně byl v roce 2023 více než dvojnásobný oproti Japonsku, které drží druhé místo. Z obrázku 4 tato skutečnost jasně vyplívá.



Obrázek 4: Instalovaný výkon soustrojí PVE jednotlivých států [58]

Čína je i provozovatelem největší PVE na světě. PVE **Fengning** v Čínské provincii Hebei dokončila výstavbu v roce 2023. Celkový instalovaný výkon je 3,6 GW. Stavby začala v roce 2013. Výstavba probíhala ve dvou fázích, každá o kapacitě 1,8 GW. Elektrárna je dle [60] vybavena dvanácti reverzními Francisovými turbínami, každá o výkonu 300 MW. Jako horní nádrž slouží řeka Luanhe a jako dolní nádrž slouží již existující vodní nádrž Fenging se standardní vodní elektrárnou. Kapacita dolní nádrže je 66,15 milionů kubických metrů vody. Efektivní spád je 425 m. Také drží rekord v nejvyšším počtu reverzních turbín. Dříve jej sdílely PVE Huizhou a Guangdong, obě v Číně.

Bývalou největší PVE na světě je PVE Bath County. Jedná se o druhou největší PVE na světě a největší PVE v Severní i Jižní Americe. Nachází se v USA ve Virginii. Hornatá krajina Virginie je ideální místo pro stavbu tohoto charakteru. Celkový výkon, který je elektrárna schopna dodat do sítě je dle [61] 3003 MW – tedy zhruba 3 GW. Elektrárna je vybavena šesti 500 MW reverzními Francisovými turbínami o celkovém průtoku zhruba 950 metrů krychlových za sekundu. Jako horní nádrž slouží přehrada na řece Little Back Creek a má kapacitu 14 milionů metrů krychlových vody a jako dolní nádrž slouží přehrada na řece Back Creek. Efektivní spád je 384 metrů. Výstavba začala v roce 1977 a byla dokončena v na konci roku 1985. Původně byla vybavena turbínami o celkovém výkonu 2,1 GW, které byly mezi lety 2004 a 2009 vylepšeny na aktuální 500 MW turbíny.

Grand Maison je největší PVE v Evropě. Nachází se ve Francouzských Alpách. Konkrétně v oblasti Isère v regionu Auvergne-Rhône-Alpes. Elektrárna je schopna dodat 1800 MW elektrické energie. Jako horní nádrž slouží přehrada Grand Maison, která má dle [54] kapacitu 140 milionů kubických metrů vody. Dolní nádrží je vodní nádrž Lac du Verney s objemem 15 milionu kubických metrů vody a plochou zhruba 185 akrů. Technologickou výbavou elektrárny je osm reverzních Francisových turbín, každá o výkonu 152,5 MW a čtyři Peltonovy turbíny, každá o výkonu 158,5 MW. Celkový průtok všech turbín je 206 kubických metrů za sekundu. Výstavba byla dle [62] zahájena v roce 1978 a byla dokončena v roce 1985.

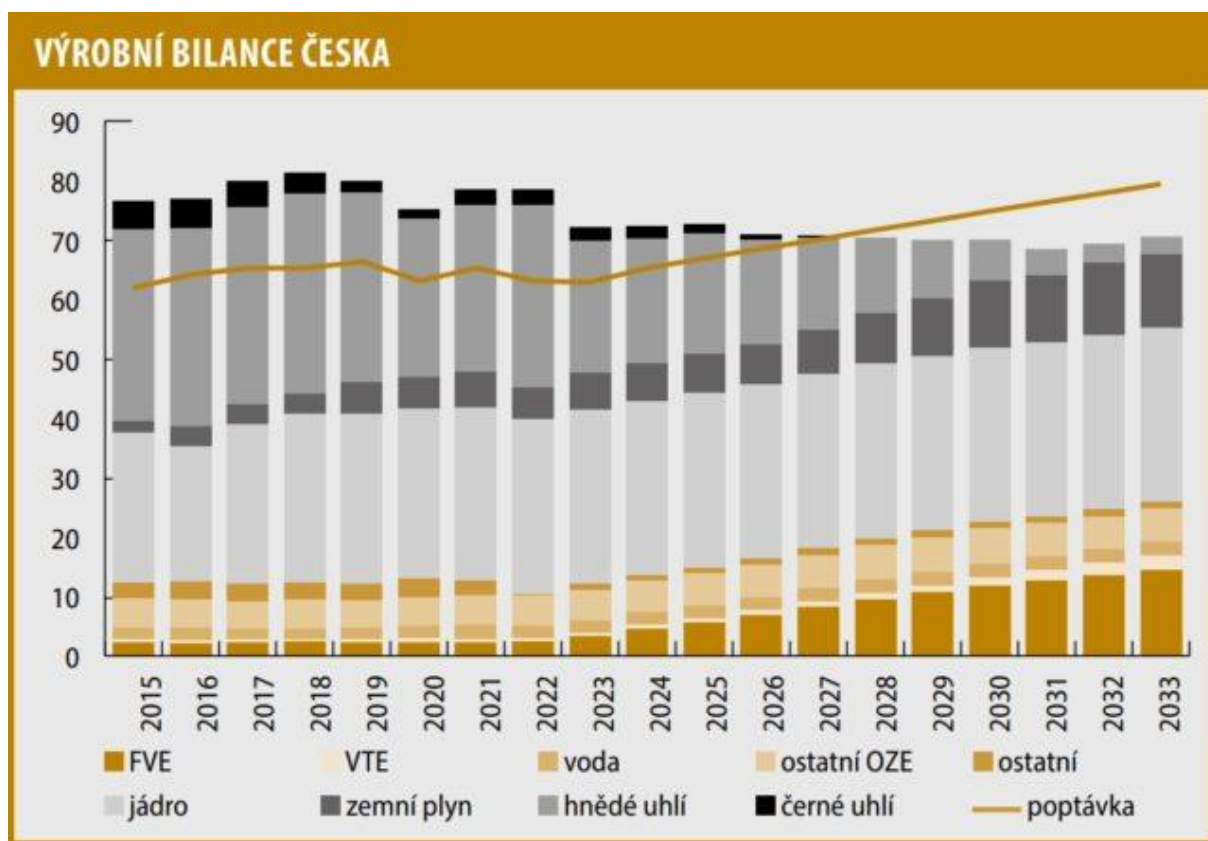
Velmi zajímavým energetickým projektem je PVE **Dinorwig**, která se nachází ve Velké Británii, konkrétně v hoře Elidir Fawr v Dinorwigu v severním Walesu. Dinorwigu se také někdy přezdívá elektrická hora. Hlavní část PVE se totiž nachází v podzemí a využívá systém jeskyň uvnitř hory, který obsahuje zhruba 16 kilometrů podzemních tunelů. Celkově je PVE složena z 11 jeskyň, z nichž nejdelší je 180 metrů dlouhá, 23 metrů široká a 51 metrů vysoká. Jeskyně, která se na místě původně nacházela byla rozšířena za účelem akomodace PVE a jedná se o největší umělou jeskyni na světě. Během jejího výkopu bylo podle [65] vyvezeno zhruba 12 milionů tun materiálu. Jedná se o nejvýkonnější PVE ve Velké Británii. Celkový výkon je dle [64] 1728 MW a elektrárna je schopná jej dosáhnout za pouhých 16 sekund. Elektrárna je vybavena šesti reverzními Francisovými turbínami, každá o výkonu 288 MW. Maximální průtok je zhruba 60 kubických metrů vody. Jako horní nádrž slouží vodní nádrž Marchlyn Mawr, která byla původně jezero, ale byla zde postavena přehrada za účelem zvýšení celkového objemu zadržované vody. Jako dolní nádrž slouží jezero Llyn Peris. Mezi oběma nádržemi je spád zhruba 500 metrů. Elektrárna byla spuštěna v roce 1984.

Za účelem využití PVE jako uložisti energie není nutné stavět obrovské nádrže anebo vyhlubovat jeskyně. Ve francouzském městě Arras se nachází nejmenší PVE na světě. V budově Goudemand byla v roce 2012 provedena rekonstrukce a budova se tak stala zcela energeticky samostatnou. Jedná se o skutečně fascinující projekt. Budova je dle [67] na střeše vybavena fotovoltaickými panely o výkonu 2,2 kW a dvěma vertikálními větrnými turbínami každé o výkonu 500 W. Horní nádrž PVE se nachází v střešním rezervoáru, který má kapacitu 60 kubických metrů vody. Dolní nádrž tvoří 5 menších nádrží, každá o objemu 10 kubických metrů vody. Výškový rozdíl mezi oběma nádržemi je 30 metrů a výrobu energie zajišťuje Peltonova turbína o výkonu 450 W. Turbína není reverzní a čerpání vody tedy zajišťuje čerpadlo o výkonu 1,5 kW. Celková kapacita PVE je 3,5 kWh elektrické energie. Budova je dále vybavena akumulátory o celkové kapacitě 24 kWh. Kvůli nedostatku dat je obtížné odhadnout ekonomickou efektivnost celého projektu, nicméně se jedná o zajímavý důkaz toho, že je možné využívat PVE i v malém měřítku.

3. Stav energetické sítě v ČR a v Evropě

3.1 Bilance a možný vývoj energetického mixu v ČR

Soustava energetických zdrojů v ČR prochází změnou. Dochází k odstavování neekologických zdrojů energie, jako jsou například uhelné elektrárny. Z ekologického hlediska je tato změna velmi vítaná, avšak naskýtá množství problému spojených se zaváděním obnovitelných zdrojů energie (dále OZE). Jedním z hlavních problémů je to, že OZE většinou nejsou schopny dodávat konstantní přísun energie do sítě. Tento rozmach OZE



Obrázek 5 Energetický mix v ČR [47]

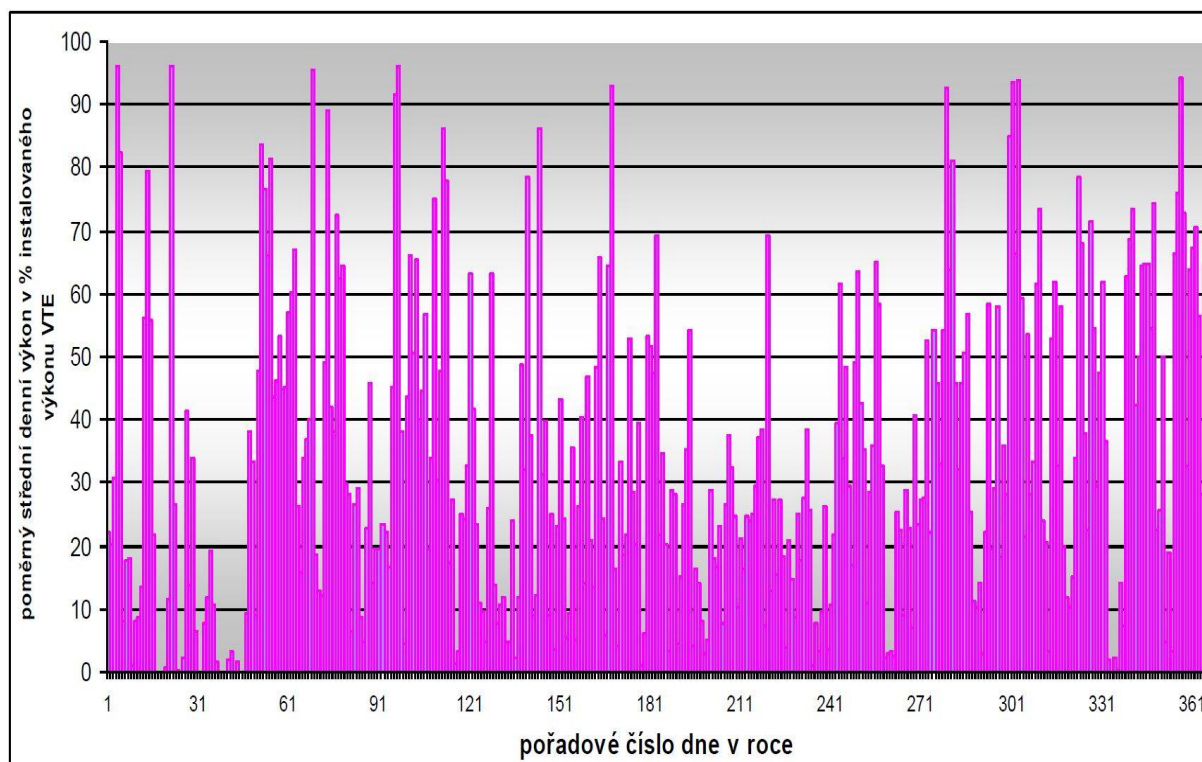
je dobře vidět na obrázku 5 Vidíme, že OZE jsou na vzestupu a projekce do roku 2033 předpokládá daleko větší rozvoj.

Dle dat z [23] se podíl OZE v energetickém mixu mezi lety 2010 a 2020 zhruba zdvojnásobil. Na výrobě elektřiny se podílí především biomasa, bioplyn, vodní elektrárny a fotovoltaické elektrárny, každý zodpovědný za zhruba 20 % z celkové vyrobené energie pomocí OZE. Větrné elektrárny jsou pak zodpovědné za zhruba 5 % vyrobené energie pomocí OZE. Z hlediska stability energetické sítě v ČR jsou vodní elektrárny a biomasa/bioplyn

neproblémové, díky jejich schopnosti dodávat stabilní dodávky energie do sítě. Problém se stabilitou sítě nastává při větším využívání fotovoltaických a větrných elektráren.

Při detailním zkoumání dat za minulé desetiletí také vidíme, že nedochází k výraznému rozvoji vodních elektráren. Energie vyrobená z vodních elektráren meziročně kolísá, ale nedochází k výraznějšímu nárůstu. Nejedná se o nic šokujícího, protože v ČR existuje jen velmi omezený počet vodních toků, které je možné využít za účelem výstavby vodní elektrárny a většina z potenciálních lokalit pro výstavbu velkých vodních děl již byla využita. V dnešní době dochází k výstavbě pouze malých vodních elektráren, které sice zvýší objem vyrobené energie pomocí vodních elektráren, ale již nijak významně.

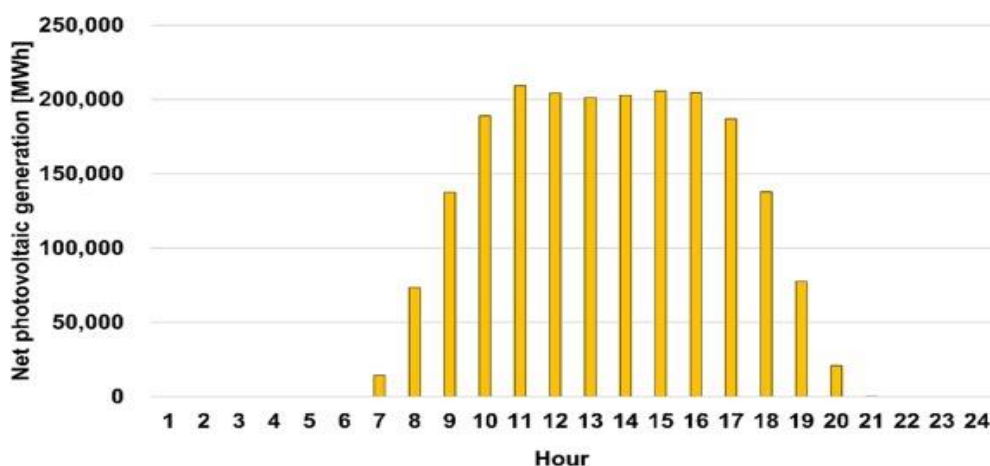
Větrné elektrárny se do konce 20. století na výrobě elektrické energie v ČR prakticky nepodílely. Jejich konstrukce a využívání začalo ve větší míře až kolem roku 2002. Od roku 2002 docházelo k výraznému rozšiřování výrobní kapacity větrných elektráren. Mezi lety 2002–2008 se výrobní kapacita větrných elektráren meziročně zdvojnásobovala a významný rozvoj pokračuje dodnes. V roce 2021 sice došlo k poklesu výroby energie z větrných elektráren, který ale není způsobený zanevřením na rozvoj větrných elektráren v ČR. Jednalo se o krátkodobý výkyv, způsobený pandemií Covid 19. Toto je znatelné na datech o instalovaném výkonu, který v roce 2021 zůstal prakticky stejný, jako v roce 2020. Využívání



Obrázek 6: Hodinová produkce energie větrných elektráren [68]

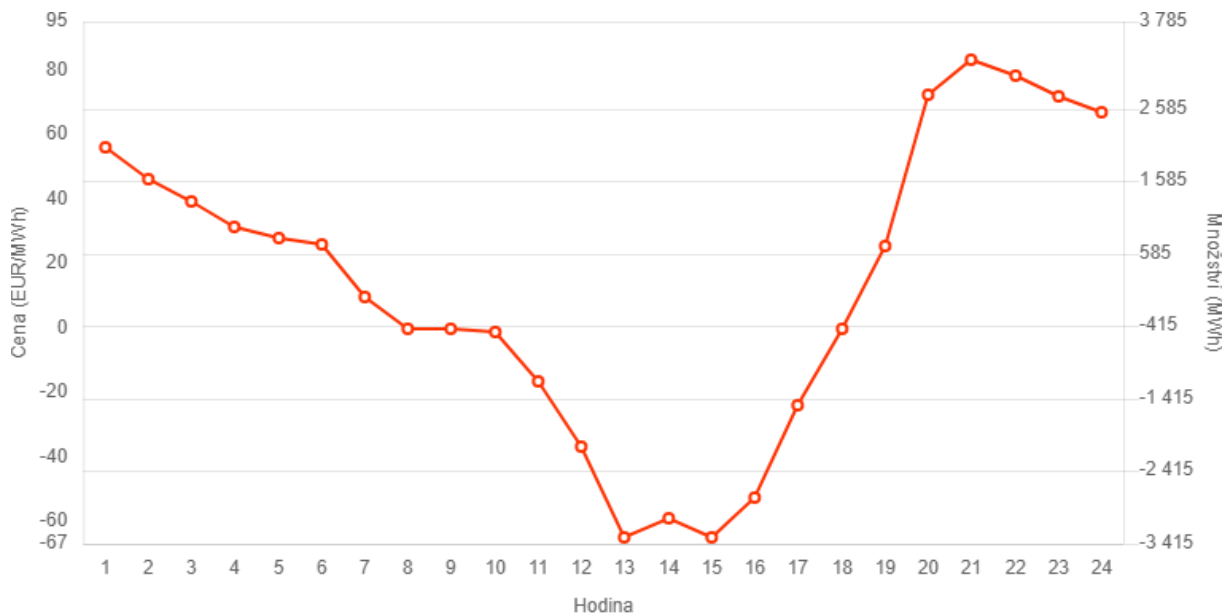
potenciálu větrných elektráren v ČR je z ekologického hlediska velmi pozitivní. Nevýhodou je bohužel relativní nestabilita dodávek elektrické energie. Na obrázku 6 vidíme denní produkci elektrické energie větrných elektráren v údolí Ebro (Španělsko). Je nutné zmínit, že se graf produkce energie může různé dny zásadně lišit. Obr. 6 spíše slouží pro představu o charakteru výroby energie pomocí větrných elektráren. Také je nutné brát v potaz, že se povětrnostní podmínky v ČR liší od těch ve Španělsku.

Fotovoltaické elektrárny představují v ČR velmi významnou složku energetického mixu. Historicky se o fotovoltaických elektrárnách (dále FVE) dá hovořit až od roku 2008. Do té doby byl objem výroby elektřiny z FVE zanedbatelný. Obrovský rozkvět FVE proběhl v roce 2011. Množství vyrobené energie pomocí FVE bylo v roce 2011 více než 300krát větší, než v roce 2007. Tento růst byl způsoben vysokými provozními dotacemi. Dalších 10 let nedocházelo dle [43] k významnějším změnám objemu výroby FVE. V roce 2023 došlo k opětovnému probuzení zájmu o rozvoj solární energetiky. Dle [47] se očekává, že koncem roku 2024 bude výrobní kapacita FVE zhruba dvojnásobná oproti roku 2022. Zájem o rozvoj FVE byl způsoben politickými událostmi na Ukrajině a s nimi spojený nárůst cen energií. Je obtížné přesně odhadnout další rozvoj solární energetiky v ČR. Většina expertů je v shodě, že dále bude docházet k rozšiřování výrobní kapacity, zejména v domácnostech. Výsledkem větší kolísání objemu výroby elektrické energie během dne. Na obr. 6 vidíme denní produkci fotovoltaických panelů z FVE v údolí Ebro. Je zde jasně vidět nestabilita dodávek energie z fotovoltaických panelů. Toto je jeden z hlavních důvodů nutnosti akumulace elektrické energie, protože s dalším rozvojem fotovoltaické energie bude nutné energii vyrobenou během dne uskladnit. Stejně jako větrné elektrárny se jedná o velmi ekologický zdroj elektrické i tepelné energie. Na rozdíl od větrných elektráren je možné spolehlivěji odhadnout denní produkci FVE, nicméně stále dochází k výkyvům v denní produkci elektrické energie.



Obrázek 7. Hodinová produkce energie fotovoltaických panelů [1]

Tyto výkyvy ve výrobě elektřiny se začínají stále výrazněji projevovat na cenách elektrické energie během dne. Tento výrazný výkyv v ceně je způsoben přebytkem výroby elektrické energie během dne. Obrázek 8 popisuje cenu elektřiny 28.4.2024 (krátce po Velikonocích). Za povšimnutí stojí, že mezi 8. a 19. hodinou byla cena energie záporná, což je zhruba polovina celého dne. V zimě FVE nepřispívají do energetického mixu zdaleka tak významně, jako na jaře, a především v létě. O Velikonocích obecně dochází k nejvýraznějším změnám cen energie během dne. V létě k tak významným výkyvům nedochází, protože v té době již energetická soustava počítá s vyšší produkcí solárních panelů a je na tyto výkyvy připravena. Během běžného života není tento výkyv tak výrazný, nicméně pokud se bude zdrojová základna ČR rozvíjet stejným způsobem jako doposud, budou tyto výkyvy výraznější a častější. Proto také dochází k významnému rozvoji infrastruktury pro akumulaci energie v ČR, jak je již výše zmíněno. Je Zde tedy jasně vidět vliv solárních panelů na cenu energie.



Obrázek 8 Cena elektřiny 28.4 2024 [20]

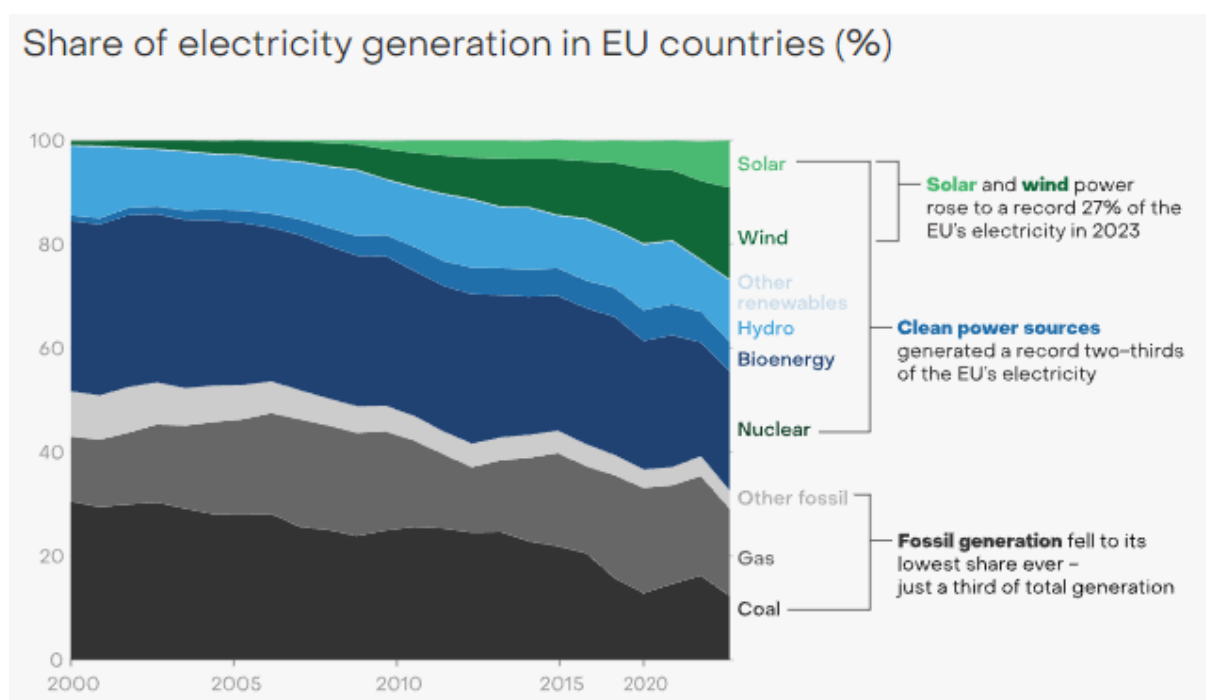
Dalším důležitým faktorem je odstavování uhelných elektráren. ČR pracuje s variantou, že budou do roku 2033 odstaveny všechny uhelné elektrárny, jak tvrdí [47]. Nebylo zatím přijato nějaké závazné rozhodnutí, ale s tímto datem se do budoucna pracuje. Odstavení veškerých uhelných elektráren představuje obrovskou výzvu, poněvadž dodávají zhruba 8,5 GW. Tuto energii je samozřejmě nutné nahradit, a proto se dá počítat s rozvojem i plynových zdrojů energie, jelikož musíme brát v potaz i teplo, které je vyráběno v teplárnách a OZE neposkytují výhodnou variantu výroby tepla. Pevné místo v českém energetickém mixu bude mít dozajista jádro. Dlouhodobě nelze očekávat nějaké výrazné zvýšení objemu výroby energie

z jaderných elektráren, ale ani jeho snížení. Jaderné elektrárny budou i nadále mít své pevné místo v českém energetickém mixu.

3.2 Evropská energetika

Při zkoumání českého energetického mixu je nutné prozkoumat i energetickou situaci v celé Evropě a zejména v Evropské unii (dále EU). ČR totiž ovlivňuje energetická politika EU jako celku, a to zejména v oblasti rozvoje OZE.

Nejvýznamnějším faktorem v evropské energetické politice je bezesporu Green Deal. Jedná se o ambiciózní celoevropský plán, který má za cíl dosáhnout toho, že Evropa jako kontinent bude uhlíkově neutrální do roku 2050. Snahou EU je dodat spotřebitelům udržitelnou, spolehlivou a cenově dostupnou energii. Otázkou ale zůstává, zda je takovýto projekt realistický. Aktuálním cílem je snížení emisí skleníkových plynů o 55 % v porovnání s rokem 1990. Na konci roku 2020 byly dle [49] emise skleníkových plynů na zhruba 68 % oproti roku 1990, což znamená snížení o zhruba 32 %.



Obrázek 9 Evropský energetický mix [48]

Na obrázku 9 je jasně vidět výrazný rozvoj obnovitelných zdrojů v EU. Je vidět, že dochází ke konzistentnímu růstu podílu větrných a fotovoltaických elektráren v evropském energetickém mixu. V roce 2023 bylo dokonce vyrobeno více elektrické energie ve větrných elektrárnách (17,6 %) než v těch plynových (16,8 %). Je tedy jasně vidět, že se EU vydává

cestou obnovitelných zdrojů. Celkový podíl OZE v evropském energetickém mixu byl v roce 2023 44 %, což je již velmi významný podíl. Největší podíl v objemu vyrobené energie mají stále jaderné elektrárny a to 22,9 %. Uhlé elektrárny jsou po celé EU dlouhodobě odstavovány a jejich podíl klesl na 12,3 % a lze předpokládat, že bude klesat i nadále. Při porovnání s rokem 2016 byl objem vyrobené energie v uhelných elektrárnách v roce 2023 poloviční.

Tento vývoj je velmi příznivý z ekologického hlediska. Dalším velmi pozitivním přínosem OZE a odstavování uhelných a plynových elektráren je energetická nezávislost. V EU ani v ČR se nenachází větší ložiska ropy nebo zemního plynu a je potřeba je dovážet. V roce 2021 bylo největším dodavatelem ropy a zemního plynu do EU Rusko. Po ruské agresi na Ukrajině bylo nutné začít hledat alternativní dodavatele fosilních paliv. Dále došlo k významnému rozvoji možností akumulace energie, což dále podporuje energetickou nezávislost EU.

4. Akumulace a funkce PVE

4.1 Možné způsoby akumulace energie

Z výše zmíněných důvodů tedy v dnešní době nabývá na důležitosti akumulace elektrické energie, a to především špičkové během spotřeby. V minulosti nebyl s akumulací energie problém, protože nebyly příliš využívány OZE a hlavním producentem elektrické energie byly uhelné, plynové nebo jaderné elektrárny a palivo pro tyto elektrárny je možné bez problémů skladovat a tím tedy i skladovat energii. OZE nemají ekvivalentní „palivo“ a není jej tedy možné skladovat. Neexistuje metoda přímého skladování energie například ze Slunce, které je, jak tvrdí [25] hlavním zdrojem absolutní většiny energie na Zemi. Existuje mnoho přírodních médií ukládání energie a nejvyužívanějším z nich jsou organická paliva (ropa, zemní plyn, uhlí, dřevo atd.), ve kterých byla a stále je energie ukládána již miliardy let. Skladování ropy a uhlí je možné bez jakýchkoli komplikací. Uhlí lze například skladovat jednoduše na hromadě, která nevyžaduje další údržbu, energii a není zatížena měřitelnými ztrátami. Skladování paliv vyrobených z ropy není o moc komplikovanější – stačí například kanystr nebo nádrž v autě poskytující stejné benefity jako hromada uhlí.

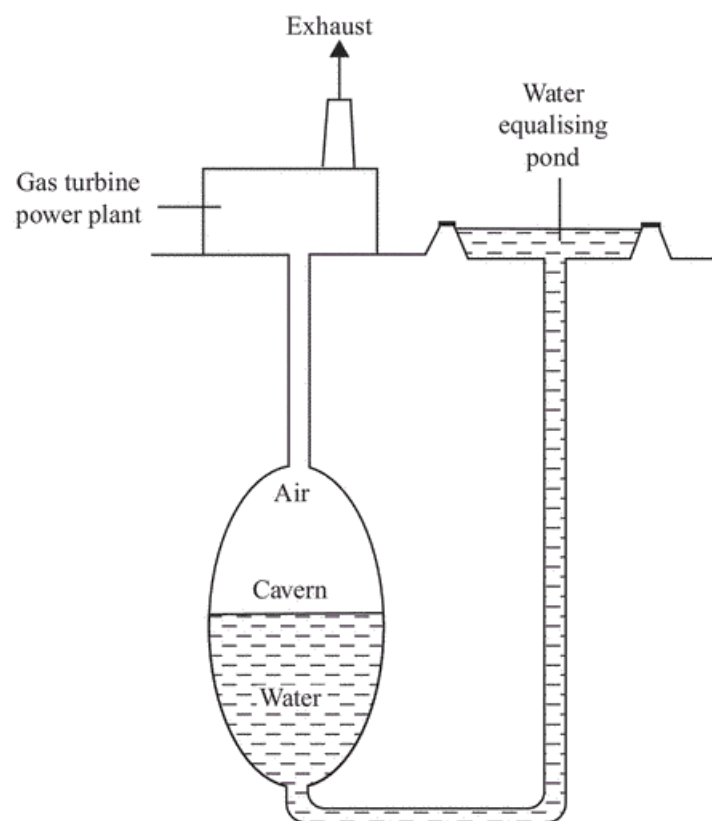
Energii vyrobenou v elektrárnách lze jen obtížně skladovat ve formě elektrické energie. Elektrická energie je transformována na jinou lépe skladovatelnou formu energie. Existuje mnoho metod akumulace, které jsou v dnešní době využívány.

První z nich je skladování tepelné energie. Tepelná energie je velmi často brána jako vedlejší produkt nebo dokonce jako ztráty. Skladování energie ve formě tepla je možné i při relativně nízkých teplotách. Energie uložená tímto způsobem, ale může být získána zpět jen ve formě tepla, které je na elektrickou energii nutné transformovat zpět. Hlavním parametrem pro akumulaci energie je, dle zdroje [25], tepelná kapacita. Pro většinu aplikací je využívána voda díky její vysoké tepelné kapacitě, široké dostupnosti a nízké ceně. Vodu lze ovšem jako skladovací médium využívat jen mezi 5 a 95 °C. Tato metoda akumulace je hojně využívána v klimatizacích anebo významněji v tepelných elektrárnách, kde je super horká pára využívána k přehřátí vody vracející se do kotle při tzv. regeneračním cyklu. Energii lze takto skladovat velmi jednoduše a dlouhodobě a lze toto skladování zefektivnit lepší tepelnou izolací. Energii lze takto skladovat krátkodobě i dlouhodobě.

Další metodou akumulace je podle [25] uskladnění energie ve formě kinetické energie v takzvaném setrvačnicku. Setrvačník je během akumulace roztočen a tím je v něm uložena

energie. Velkou výhodou této metody je snadná a efektivní přeměna na elektrickou energii. Setrvačnick lze napojit na hřídel generátoru. Tato metoda je již známa velmi dlouhou dobu a v praxi byla využívána například ve Švýcarsku ve 40. a 50. letech minulého století. Bohužel i tato metoda má svá úskalí. Prvním z nich jsou mechanické ztráty způsobené třením a odporem vzduchu. Tyto ztráty lze omezit využíváním efektivnějších tvarů setrvačnicku a elastičtějších materiálů, ale není možné se jich kompletně zbavit. Další problém nastane, při odebírání energie ze setrvačnicku. Pokud byl setrvačnick roztočen na jeho maximální pracovní rychlost, je možné odebrat energii do té doby, než se setrvačnick otáčí zhruba 0,2násobek maximální rychlosti. Poté již není energie v setrvačnicku využitelná. Proto je tedy v praxi vhodné tuto metodu využívat pro krátkodobé skladování energie.

Energii lze také skladovat ve formě stlačeného vzduchu. Pro skladování velkého množství energie lze využívat podzemní jeskyně ať už přírodní nebo umělé. Lze také využívat uměle postavené nádrže, ale tato metoda není ekonomicky vhodná pro větší objem



Obr. 10: Schéma akumulční tlako-plynné elektrárna s konstantním tlakem ve vzduchové nádrži [25]

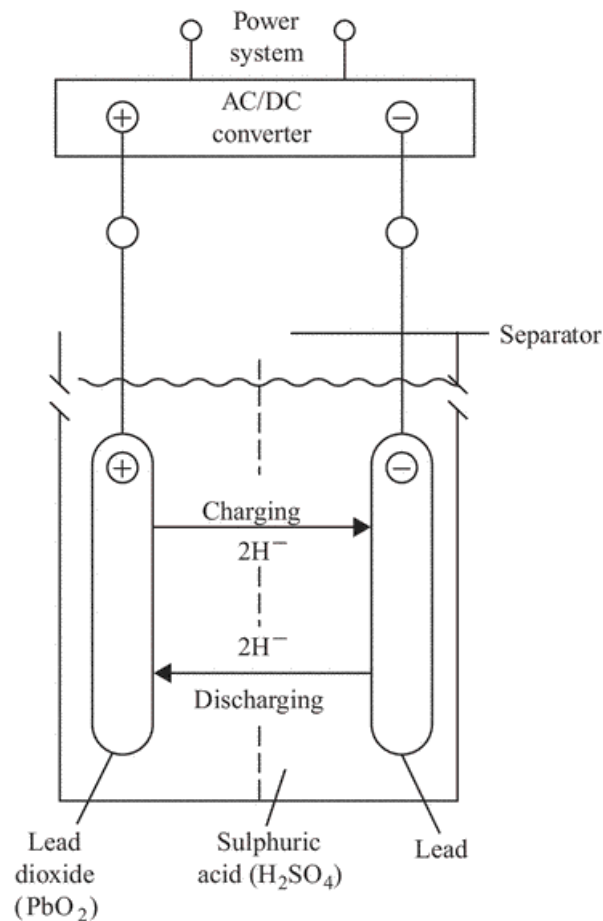
akumulované energie. Během nízké poptávky po elektické energii je spuštěn kompresor, který využívá elektickou energii ze sítě pro nabrání a stlačení vzduchu. Tento stlačený vzduch je

následně odeslán do místa uskladnění natlakovaného vzduchu. Energie je akumulována. Během zvýšené poptávky nebo dokonce špičky je následně vzduch ze skladiště postupně odebírán a pomocí turbíny a generátoru je pak vyráběna elektrická energie. Maximální možná velikost uskladněné energie je dána velikostí skladovací nádoby a tlakem který je schopný kompresor dodat, případně, který je skladovací nádoba schopná snést. Za účelem stabilního odběru energie z nádrže je možné využít vodního sloupu pro dosažení konstantního tlaku vzduchu v nádrži. Tato metoda je vyobrazena na obrázku číslo 5. Vodní sloup udržuje pomocí svého hydrostatického tlaku konstantní tlak v nádrži. Díky tomu je pak turbína během odběru energie poháněna konstantním tlakem až do vyčerpání nádrže. Tato metoda samozřejmě není dokonalá. Je nutné brát v potaz mechanické ztráty při kompresi vzduchu a při jeho odčerpávání. Dále je velmi obtížné najít vzduchotěsnou jeskyni. Tuto jeskyni lze vyrobit uměle, ale není to ekonomicky výhodné. Je tedy nutné brát v potaz i ztráty vlivem úniku uskladněného vzduchu. Během odebírání také může dojít k tomu, že při vysokém tlaku se molekuly vzduchu vtlačí do vody a vznikne dá se říci perlivá voda. Pokud je nadále zvyšován tlak, tak voda nebude schopna pojmout více vzduchu a ten pak začne unikat ven skrz vodní sloupec. Dále je vzduch uložený ve vodě během dekomprese uvolňován bublinami, které mohou rázovým zvýšením tlaku poškodit mechanismus turbíny. Tato metoda v praxi často využívána i v kombinaci s tepelným skladováním, kde se během napájecího cyklu mění tlak i teplota za účelem vyšší efektivity. Aktuálně existují plány na postavení akumulátoru o výkonu 1050 MW v Rusku.

Další často využívanou metodou akumulace energie je výroba syntetických paliv a, v dnešní době stále nabírající na významu, výroba vodíku. Na výrobu syntetických paliv je nutné vynaložit energii, kterou je pak možné během špiček jednoduše uvolnit. Blíže se zaměříme na výrobu vodíku. Vodík lze vyrábět několika způsoby. Některé z nich jsou: rozklad vody elektrolýzou, chemická reakce (oxidace i redukce – záleží na konkrétním postupu) a ultrafialová radiace. Aby každá z uvedených metod výroby fungovala, je do systému nutné dodat energii. Například na výrobu 1 kg vodíku elektrolýzou je nutné dodat zhruba 50 kWh elektrické energie [27]. Na rozdíl od skladování plynů, které je popsáno výše, je nutné na skladování vodíku vynaložit větší úsilí. Atomy vodíku jsou totiž velmi malé a díky tomu jsou schopné proniknout prakticky jakoukoli trhlinou v nádrži. Vodík je proto často skladován v chemických sloučeninách, které je pak velmi snadno možné rozložit. Mezi ostatní syntetická paliva patří třeba methan, který je skladován často v plynojemech.

Poslední metodu akumulace energie, kterou zde budu do detailu zkoumat je elektrochemická akumulace. Jedná se o nejvíce tradiční způsob ukládání energie a jeho historie

sahá až do 19. století [25]. V dobách, kdy byl využíván hlavně stejnosměrný proud byl tento způsob akumulace dominantní a stačil na pokrytí špičkové spotřeby. V dnešní době je sice králem výkonové elektrotechniky střídavý proud, ale i přes to je elektrochemická akumulace energie stále hojně využívána. Principem funkce elektrochemického akumulátoru neboli baterie je přeměna elektrické energie na energii chemickou, kterou je jednoduše možné převést zpět na elektrickou energii.



Obr 11 – Baterie olovo-kyselina [25]

Na obrázku 11 vidíme princip jedné z nejrozšířenějších baterií, a to baterie olovo-kyselina, která je vyžívaná jako baterie v automobilech. Tento způsob akumulace je velmi rozšířený díky jeho vysoké efektivitě a nízkým nákladům na údržbu. Mezi nevýhody patří nízké napětí poskytované a akumulátorem a skutečnost, že během vybití baterie dodává pouze stejnosměrný proud, který je možné střídačem převést na střídavý, ale je tím snížena účinnost.

4.2 Akumulace energie v PVE a její funkce

Akumulace energie v PVE má v České republice téměř stoletou historii, jak uvádí [12]. V České republice bylo vystavěno mnoho vodních elektráren a v dnešní době je již většina velkých toků, vhodných pro výstavbu vodních elektráren, využita. Z veškeré skladované elektrické energie na celém světě je podle [29] 95 % uskladněno právě v PVE.

Dnes se ČR stále více orientuje na výstavbu OZE, které, jak je již detailně popsáno výše, nejsou schopny stabilních dodávek elektrické energie. Proto se stále více mluví o výstavbě nových PVE, které mají dostatečný výkon a kapacitu, aby mohly efektivně regulovat energetickou síť.

Princip funkce PVE je v celku jednoduchý. Skládá se ze dvou nádrží, a to horní nádrže a dolní nádrže. Dolní nádrž je vždy větší než horní nádrž a v mnoha případech se jedná i o vodní tok. Dále je vybavena přivaděčem, který spojuje horní a dolní nádrž, turbínou, čerpadlem, a generátorem. Často se používá reverzní turbína, která je schopný obousměrného chodu a pak je potřeba PVE vybájit motorem i generátorem.

V akumulacním režimu PVE spotřebovává elektrickou energii ze sítě, pomocí které čerpá vodu z dolní nádrže do horní. Energie je pak skladována ve formě potenciální energie uložené vody. Uloženou energii vody lze vypočítat podle vztahu:

$$E_p = \rho \cdot g \cdot h \cdot V \cdot \eta_c \quad (1)$$

Kde

E_p je potenciální energie uložená v nádrži [J]

ρ je hustota vody [kg/m^3]

g je tíhové zrychlení [m/s^2]

h je spád mezi dolní a horní nádrží [m]

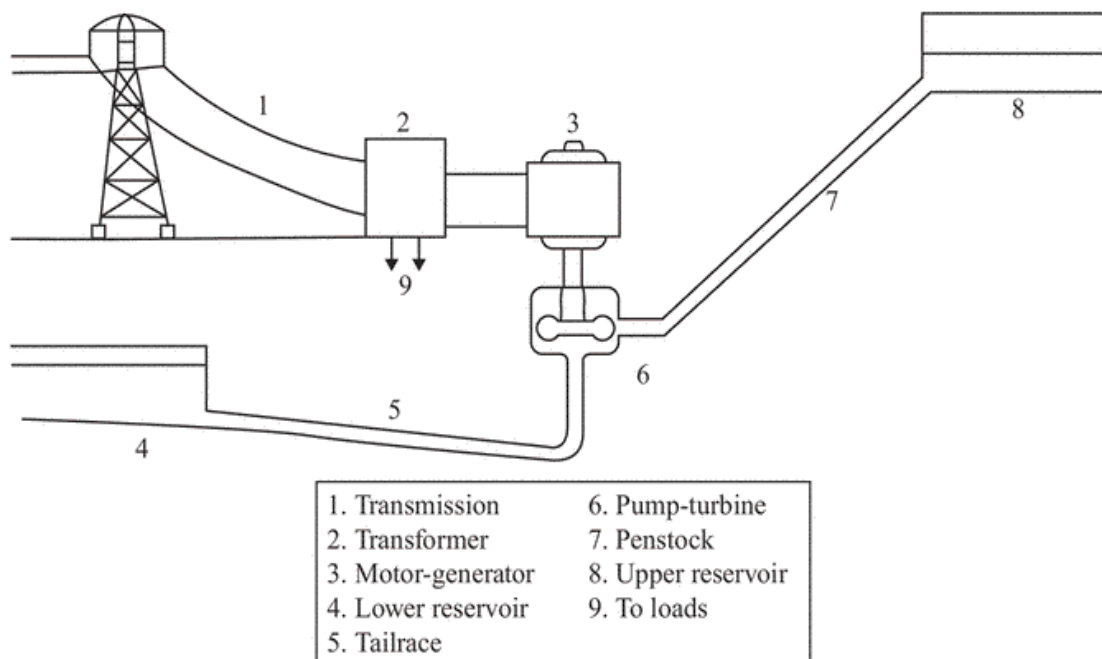
V je objem načerpané vody [m^3]

η_c je účinnost čerpání [-]

Vztah (1) reprezentuje, s jakou účinností jsme schopni převést elektrickou energii v síti na potenciální energii akumulovanou v elektrárně. Účinnost celého cyklu se pohybuje dle [29] mezi 70 % a 95 % a závisí na designu turbíny, jejím opotřebení, počtu turbín v celé PVE.

Množství akumulované energie v PVE je dáno: objemem akumulární nádrže, spádem a účinností turbíny a soustrojí. Na uložení 1 MWh je potřeba dle [29] načerpat zhruba 4 tisíce m³ vody se spádem 100 m. Akumulace zpravidla probíhá v časech, kdy je nízká poptávka po elektrické energii například v noci.

Během vyšší poptávky po elektrické energii se začne PVE chovat obdobně jako normální vodní elektrárna a pracuje v generátorovém režimu. Z nádrže je vypouštěna voda, která teče z horní nádrže do dolní, gravitací se zrychlí, roztáčí turbínu ve strojovně a následně odteče do dolní nádrže. V praxi jsou dle [21] většinou využívány reverzní Francisovy turbíny, které jsou schopny pracovat jako standardní turbína v generátorovém režimu a jako čerpadlo v motorovém režimu provozu PVE.



Obrázek 12: Schéma přečerpávací vodní elektrárny [25]

Celková účinnost PVE se pohybuje mezi 70 %-85 %. Do budoucna není pravděpodobný významný průlom ve zvýšení efektivity PVE a růst efektivity bude pravděpodobně pouze v jednotkách procent. Ztráty tedy nejsou zanedbatelné. Ztráty, které PVE zatěžují, můžeme rozdělit do dvou hlavních skupin:

- a) Ztráty ve strojovně + čerpání a vypouštění
- b) Ztráty během skladování vody

Ztráty v bodě a) lze dále dělit. První složkou jsou hydraulické, tepelné a mechanické ztráty v turbíně [29] a druhou složkou jsou mechanické, Jouleovy ztráty, ztráty v železe statoru a ztráty v budicím vinutí generátoru [4] Během čerpání a vypouštění také vznikají ztráty vlivem tření vody v přivaděči a turbulencemi, které jsou způsobeny nelaminárním prouděním vody [29]. Užitečný spád je pak zhruba 90 % z celkového výškového rozdílu mezi dolní a horní nádrží. Ztráty v bodě b) jsou tvořeny především vypařování uskladněné vody. Tyto ztráty jsou závislé na venkovní teplotě, tlaku a povětrnostních podmínkách [30] a je možné je omezit například instalací plovoucích solárních panelů na hladince horní nádrže. Snížil by se tím výpar, díky již přítomné síťové infrastruktuře by nebylo připojení těchto panelů do sítě nákladné a jedná se o OZE. Výsledný výkon, který je PVE schopna poskytovat je pak dán tímto vztahem:

$$P = \rho \cdot Q \cdot g \cdot h_u \cdot \eta \quad (2)$$

Kde

P je výkon vyráběný PVE [W]

Q je průtok turbínou [m^3/s]

h_u je užitečný spád [m]

g je tíhové zrychlení [m/s^2]

η je účinnost v generátorovém režimu [-]

4.3 Statické služby

Statické služby poskytované PVE spočívají v optimalizaci využití elektrické energie. Jinými slovy, PVE transformuje levnou elektrickou energii z období přebytku na energii, která je vysoce ceněná v době špičkové spotřeby. Tím nejenže vlastník PVE získává zisky z marže při prodeji elektrické energie, ale zároveň umožňuje plynulý provoz elektráren s obtížně regulovatelnými zdroji, jako jsou jaderné a uhelné elektrárny a také s intermitentními zdroji, které nejsou regulovatelné prakticky vůbec.

Regulace výkonu těchto elektráren přináší výkonové ztráty, které se následně promítají do ztrát ekonomických. Na denním trhu s elektrickou energií se setkáváme i s hodinami, kdy je elektrická energie prodávána za zápornou cenu [31]. Pokud je ve stejný den i v době vyšší poptávky po elektřině vysoká cena, povede to k velmi vysokému výnosu.

S ohledem na situaci v oblasti OZE je možné předpokládat, že se bude zvyšovat počet dnů s výraznějšími výkyvy výkonu. Z tohoto důvodu je rozumné investovat do výstavby PVE, které jsou schopny efektivně pracovat v prostředí kolísavých cen elektrické energie. Nabízí se dvě hlavní možnosti: buď výstavba PVE s velkým instalovaným výkonem, který umožňuje krátké časy pro čerpání a vyprazdňování celého využitelného objemu horní nádrže, nebo PVE s rozsáhlým využitelným objemem vody, která může plynule přecházet mezi čerpadlovým a turbínovým provozem během dne a vždy disponuje dostatečným objemem vody pro využití.

Klíčovým parametrem spojeným s množstvím obchodované elektrické energie je energetická kapacita. Tato kapacita musí umožňovat dostatečně dlouhý provoz PVE k stabilizaci zatížení v elektrické síti s ohledem na bezpečný provoz energetického skladu. Z ekonomického hlediska znamená velká energetická kapacita vyšší zisky při příznivých cenách nakupované a prodávané elektřiny. Avšak velká energetická kapacita současně znamená i rozsáhlý využitelný objem, který může být dosažen buď zaplavením velkého území, nebo využitím velkého spádu, který nabízí horské oblasti v České republice. Obě tyto možnosti přinášejí problémy, které představují hlavní výzvy při stavbě elektráren tohoto typu.

4.4 Dynamické služby

Druhou velmi důležitou službou, kterou PVE poskytují jsou dynamické služby. Dynamické služby neboli služby výkonové rovnováhy spadají pod podpůrné služby, které jsou do detailu popsány v [34]. ČEPS (Česká elektroenergetická přenosová soustava) na denním trhu s elektřinou kupuje od poskytovatelů tyto podpůrné služby. Mezi podpůrné služby patří:

- Regulace FCR (Frequency Containment Reserve). Jedná se o lokální funkci, která má za úkol změnit jednotky výkonu o přesně definovanou odchylku, která je závislá na odchylce frekvence od zadané hodnoty (kmitočtu v síti). Změna frekvence je předem rezervovaná na určitou velikost zálohy a maximální velikost rezervované odchylky je 200 mHz. Je zároveň nutné, aby byla rezervovaná záloha uvolněna do 30 s, tedy aby došlo do 30 s k požadované korekci frekvence v síti.
- Regulace aFFR (automatic Frequency Restoration Reserve). Tato služba je zajištěna změnou hodnoty výkonu daného zdroje. Regulátor frekvence a výkonu požaduje hodnoty, které musí pak poskytovatel splnit. Dispečink ČEPS pak udává míru využití aFFR. Plná aktivace musí proběhnout do 7,5 minut, stejně jako deaktivace. Celý proces je plně automatizovaný.

- Regulace mFFR (manual Frequency Restoration Reserve). Tato funkce je realizovaná skrz změnu hodnoty výkonu regulované jednotky. ČEPS si na denním trhu zarezervuje od poskytovatele určitý počet MW a platí poskytovateli za každou hodinu, kdy je výkon rezervován. V době potřeby dispečink ČEPS dá poskytovateli pokyn ke spuštění a ten začne dodávat rezervovaný výkon do sítě. Doba plné aktivace je 12,5 minut
- Regulace mFFR₅. Stejná služba v principu stejná jako mFFR s tím rozdílem, že poskytovatel musí splnit o několik podmínek více. Doba do plné aktivace (tedy plného výkonu) a deaktivace je 5 minut. Dále musí být poskytovatel schopen výkon dodávat alespoň 4 hodiny. Minimální poskytovaná výkon je 1 MW a maximální poskytovaný výkon je 99 MW. Jedná se tedy o službu, která je přímo ideální pro PVE. V rámci zjišťování ekonomické efektivity bude teoretická PVE poskytovat právě tuto službu.
- Zálohy pro náhradu RR (Regulation Reserve). Jak název napovídá, jedná se o záložní regulační službu
- Sekundární regulace U/Q – jedná se o automatickou funkci regulace jalového výkonu dané jednotky. Snahou je udržet zadané velikosti napětí v uzlech energetické sítě. Zařízení poskytující službu jsou většinou nevýrobní.
- Schopnost ostrovního provozu
- Schopnost startu ze tmy

5. Výpočet marže

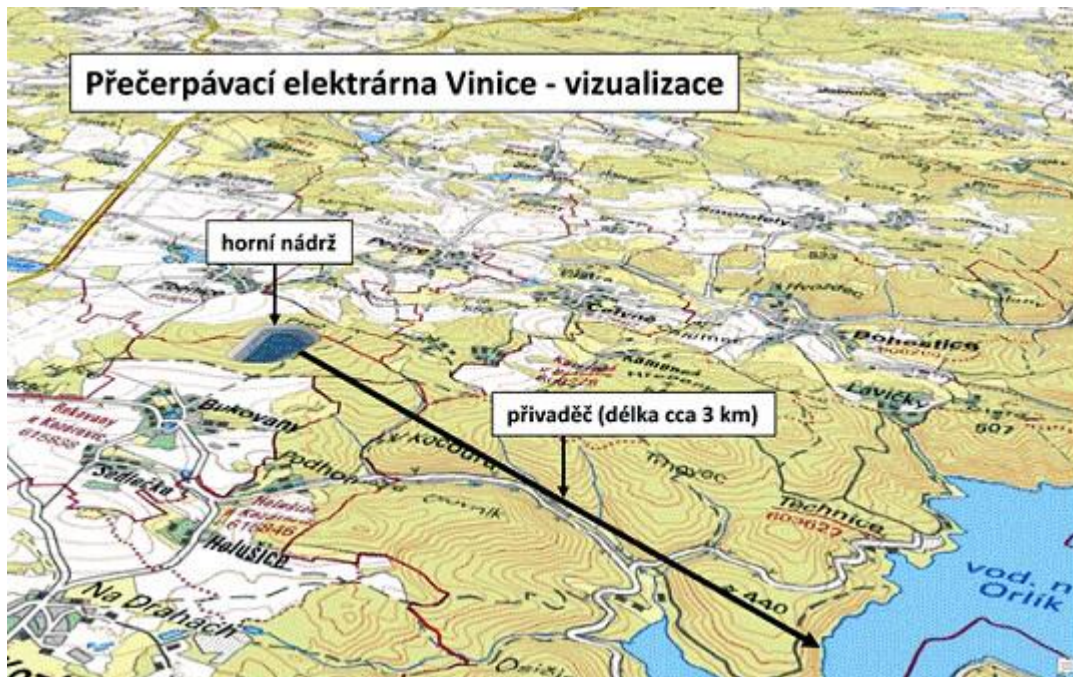
Pro výpočet teoretické marže budu zkoumat pro několik scénářů, které budou do detailu popsány níže. Provedeme odhad možného zisku na základě údajů z OTE-ČR a ČEPS z roku 2022 a 2023 [32], [35]. Zkoumány budou jak statické, tak dynamické služby. Výpočet marže ze statických služeb vyhází z marginálních cen elektřiny na denním trhu. Tato cena je známa 24 hodin předem a je brána v potaz, za účelem maximalizace obchodní marže a počítána. Dynamické služby budou také zkoumány na základě cen služby mFFR₅, kterou by PVE poskytovala společnosti ČEPS. Výpočty jsou provedeny pro teoretickou PVE Vinice-Pteč o výkonu 440 MW. Celková účinnost teoretické PVE je zhruba 80 %. Do výpočtu celkového výnosu jsou také zahrnuty náklady za odebíranou energii při čerpání. Je nutné brát v potaz jistá omezení, kterými by byla teoretická PVE zatížena. První z nich je omezená kapacita horní nádrže (v našem případě 4,4 milionů kubických metrů), další z nich je nutná zásoba vody pro splnění dynamických služeb v případě, že dispečink ČEPS vydá pokyn.

Provedení výpočtu je v příloženém souboru Výpočet marže.xlsx v Příloze č.1.

5.1 Popis teoretické PVE

Subjektem ekonomické analýzy bude plánovaná PVE Vinice-Pteč, situovaná u Orlické přehrady. Jedná se o velmi aktuální projekt, protože MŽP již začalo provádět kroky nutné k jeho realizaci.

Dle informací z [43] by jako dolní nádrž sloužila samotná vodní nádrž Orlík a horní nádrž by se vybuďovala na vrcholu kopce Pteč s nadmořskou výškou 633 metrů nad mořem. Vodní nádrž Orlík se nachází v nadmořské výšce 350 m. n m. Lze tedy předpokládat spád zhruba 270-280 metrů. Bude záležet na konkrétním provedení výkopových prací. Propojení mezi nádržemi by zajišťovalo zhruba 3 kilometry dlouhé potrubí o průměru 4,5 m. Strojovna by byla vybudována v dolní části PVE a byla by vybavena čtyřmi turbínami, každé o výkonu 110 MW. Celkově by tedy PVE disponovala 440 MW. Kapacita horní nádrže by činila zhruba 4,4 milionu kubických metrů vody. Dle plánu MŽP by roční výroba činila zhruba 220 000 MWH. Výstavba by měla trvat přibližně 14 let. Na obrázku 13 je vidět, jak by zhruba měl celý projekt vypadat.



Obrázek 13: PVE Vinice – Pteč [44]

5.2 Zkoumané scénáře

V rámci výpočtu ekonomické efektivity se budu zabývat čtyřmi scénáři. Všechny scénáře představují realistický způsob, jakým by PVE mohla fungovat.

1. První scénář vychází z dat z roku 2022. PVE bude poskytovat pouze statické služby a bude tedy možné využívat celou její kapacitu pro přečerpávání. Lze očekávat, že výnos ze statických služeb bude vyšší, než kdyby PVE poskytovala i dynamické služby.
2. Druhý scénář je identický jako scénář 1, ale vychází z dat z roku 2023. Scénáře jsou rozděleny kvůli tomu, že v roce 2022 byly výkyvy v cenách elektřiny dle [32] velmi výrazné. V roce 2023 cena elektřiny tolik nekolísala. Díky tomu je rok 2023 lepším modelem pro budoucí roky z hlediska cen elektřiny.
3. Třetí scénář vychází z dat z roku 2022. Tentokrát bude PVE poskytovat i dynamické služby a je tedy snížena kapacita horní nádrže, kterou lze využít pro přečerpávání.
4. Čtvrtý a poslední scénář vychází z dat z roku 2023. Princip je stejný jako scénář 3. Důvody rozdělení jsou stejné jako v případě druhého scénáře. Zásadním rozdílem mezi scénářem 3 a 4 jsou ceny dynamických služeb. Cena služby mFFR₅ je totiž oproti minulému roku téměř dvojnásobná. Je vidět, že společnost ČEPS bere v potaz rychlý rozvoj OZE a tím implikace s ním spojené.

5.3 Porovnání marží scénářů

Varianta	2022 bez DS	2023 bez DS	2022 s DS	2023 s DS
Výnos ze stat. služeb [mil. Kč]	1015,34	626,64	927,48	601,44
Výnos z dyn. služeb [mil. Kč]	0	0	560,52	1344,88
Celkem [mil. Kč]	1015,34	626,64	1488,00	1946,32

Tabulka 1: Marže scénářů

V tabulce 1 jsou jasně vidět hodnoty ročních výnosů jednotlivých scénářů. Z tabulky vyplývá několik důležitých informací.

První je výrazný rozdíl ve výnosech bez dynamických služeb a s nimi. Rozdíl je největší v roce 2023, kdy je výnos s dynamickými službami téměř trojnásobně větší než bez nich. Je tedy vidět, že dynamické služby jsou velmi výhodné pro mnou zkoumanou PVE. Také je vidět, že při poskytování dynamických služeb je výnos ze služeb statických nižší. V roce 2022 je výrazně nižší, a to o téměř 90 milionů Kč, což je pokles o 9,1 %. Toto opět vypovídá o divokém kolísání cen energie v tomto roce oproti roku 2023, kde je výnos nižší pouze o zhruba 25 milionů Kč, což je pokles o zhruba 4 %.

Druhou je významný pokles výnosů ze statických služeb v roce 2023 oproti roku 2022. Souvisí to se stabilizací energetického trhu. Jedná se o meziroční pokles zhruba 38 % výnosů z roku 2022 a jedná se tedy o značnou změnu.

Vzhledem k tomu, že jsou investiční a provozní náklady PVE stejné pro všechny scénáře, usuzuji, že nejvýhodnější varianta je scénář 4. To ale neznamená, že by ostatní scénáře nemusely být výhodné. Ekonomická efektivnost všech scénářů bude probrána níže.

6. Náklady

Pro výpočet ekonomické efektivity je nutné znát investiční výdaje a provozní náklady po dobu životnosti PVE. Životnost PVE může podle [38] být až 80 let. V dnešní době existuje již mnoho přečerpávacích vodních elektráren, které fungují již přes 40 let a po renovacích stále fungují a pravděpodobně ještě dlouho fungovat budou jako například PVE Dalešice.

6.1 Investiční náklady

Celkové investiční náklady dle [43] MŽP odhaduje na 28 miliard Kč. Pro úplnost ještě provedu odhad investičních nákladů.

Investiční náklady lze podle [38] odhadnout jako 2202 USD/kW po přepočtu na české koruny dle průměrného kurzu za posledních 10 let [68], vyjdou měrné investiční náklady na výstavbu $n_i = 50$ tis. Kč/kW. Dále platí, že výkon této teoretické PVE má být $P_t = 440$ MW. Celkové investiční náklady pak vypočítáme jako:

$$N_i = n_i \cdot P_t = 50 \cdot 10^3 \frac{\text{Kč}}{\text{kW}} * 440\,000 \text{ kW} \cong 22 \text{ miliard Kč}$$

Investiční náklady dle odhadu vychází o poznání méně, nicméně se jedná o pouhý odhad vycházející z měrných nákladů. Pro další výpočty budu vycházet z hodnoty, kterou stanovilo MŽP. Výpočet ekonomické efektivity provedu pro obě hodnoty investičních nákladů.

6.2 Provozní náklady

V rámci výpočtu provozních nákladů budeme zkoumat dvě kategorie mzdové a ostatní provozní náklady.

Mzdové náklady se odvíjí od počtu pracovníků dle zdroje [41] lze odhadnout počet pracovníků na zhruba 40 lidí. Dále musíme vzít v potaz průměrnou mzdu pracovníků v oboru výroba a rozvod elektřiny, plynu, tepla, která v roce 2022 vyšla na 58 923 Kč měsíčně dle dat z [39]. Celkové roční mzdové náklady pak vyjdou na 28,3 mil. Kč ročně.

Ostatní provozní náklady pokrývají položky jako oprava a údržba strojů, turbíny a nádrží, správní režii a několik dalších. Lze je odhadnout dle [40] jako 0,5 % z celkové investice. Ostatní provozní náklady vyjdou na 118,3 milionu Kč ročně.

Po sečtení dílčích provozních nákladů dostaneme, že celkové provozní náklady vyjdou:

$$N_{pr} = 0,05 * N_i + N_m = 146,58 \text{ mil Kč/r}$$

, kde N_{pr} jsou roční provozní náklady [Kč/r]

N_i jsou investiční náklady [Kč]

N_m jsou náklady na mzdy [Kč/r]

S touto částkou budu nadále pracovat při výpočtu ekonomické efektivity.

7. Vyhodnocení ekonomické efektivity

Nyní jsou známy téměř všechny potřebné údaje pro určení ekonomické efektivity. Budu využívat metodu RCF – ročního ekvivalentního peněžního toku. Metoda RCF ukazuje roční rozdíl mezi celkovými výnosy a ročními náklady, ke kterým jsou připočtené investiční náklady rozdělené po dobu životnosti zařízení. Poměrnou roční anuitu lze podle vztahu:

$$a_r = \frac{(1+r)^{T_z \cdot r}}{(1+r)^{T_z} - 1} \quad (3)$$

Kde

r je diskontní sazba, která je podle [38] 6 % [-]

T_z je doba životnosti (v našem případě 80 let) [roky]

a_r je poměrná roční anuita [-]

Poměrná roční anuita představuje, jak velký díl z investičních nákladů připadá na každý rok životnosti celého projektu. Pomocí diskontní míry lze vyjádřit současnou hodnotu budoucích peněžních toků. Čím vyšší je diskontní míra, tím je současná hodnota budoucích peněžních toků nižší. Dá se říci, že udává rizikovost celého projektu

Po dosazení do rovnice (3) vychází, že roční poměrná anuita ve výši 0,0594. Nyní máme vše potřebné pro výpočet RCF, které získáme podle vztahu:

$$RCF = V_r - N_{pr} - a_r \cdot N_i \quad (4)$$

Kde

V_r jsou předpokládané konstantní roční výnosy [Kč]

N_{pr} jsou stálé roční provozní náklady [Kč]

a_r je poměrná roční anuita [-]

N_i jsou investiční náklady [Kč]

Výpočet poměrné anuity a RCF jsou provedeny v příloze č.1. Hodnoty, které z výpočtů vyšly je nutné brát orientačně. Není možné přesně předpovědět, jakým způsobem se bude trh s elektřinou a dynamickými službami chovat. Nicméně pokud nedojde k výrazným změnám budou výsledky platné i v budoucnu.

Dalším důležitým ukazatelem ekonomické efektivity je NPV (Net Present Value) – čistá současná hodnota. Jedná se o další ukazatel ekonomické efektivity. NPV měří rozdíl mezi současnou hodnotu všech budoucích příjmů a výdajů spojených s počáteční investicí. Pokud je NPV kladné je možné investici považovat za výhodnou. NPV bylo ve použito pro výpočet doby návratnosti investice. Investici považují za navrácenou ve chvíli, kde je NPV větší než 0.

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} - N_i \quad (5)$$

, kde CF_t jsou peněžní toky v roce období t [Kč]

r je diskontní míra [-]

t je časové období (v tomto případě roky)

n je počet časových období

N_i je počáteční investice

Po provedení výpočtů vyšly následující hodnoty:

Inestiční náklady [mil. Kč]	Varianta	RCF [mil Kč]	Doba návratnosti [r]
28 000	2022 bez DS	-817,21	-
	2023 bez DS	-1205,91	-
	2022 s DS	-344,55	-
	2023 s DS	113,77	35
22 000	2022 bez DS	-430,58	-
	2023 bez DS	-819,28	-
	2022 s DS	42,08	38
	2023 s DS	500,40	20

Tabulka 2: Porovnání efektivity

Výsledkem je tedy, že pro investiční náklady 28 mld. Kč, jak odhaduje MŽP, jediná varianta, kdy se celý projekt vyplatí je varianta 4. Je vidět, že bez dynamických služeb je celý projekt velmi nevýhodný a je tedy rozhodně nutné poskytovat i dynamické služby, aby se PVE vůbec vyplatila. V roce 2022 se nevyplatí ani jedna varianta. Kdybych prováděl analýzu ekonomické efektivity pouze pro tento rok, označil bych projekt za nevýhodný. Rok 2023 ale nabízí zcela jiný obrázek. PVE by se bez poskytování dynamických služeb nevyplatila – jedná se dokonce o nejméně výhodnou variantu. Při poskytování dynamických služeb jsou výnosy dostatečně vysoké na to, aby bylo RCF kladné a tuto variantu lze označit za výhodnou.

Z výpočtů NPV vychází, že doba návratnosti investice je 35 let, což je zhruba polovina životnosti celé PVE.

Pro investiční náklady 22 mld. Kč, které byly odhadnuty podle měrných nákladů [38], je celý projekt o poznání výhodnější. Varianty bez poskytování dynamických služeb stále výhodné nejsou, nicméně je jejich RCF vyšší zhruba o 400 milionů Kč. Varianty s poskytováním dynamických služeb jsou v tomto případě ekonomicky výhodné obě. Z vypočteného NPV těchto variant jsem určil, že pro rok 2022 je doba návratnosti 38 let, což je opět zhruba polovina celkové životnosti PVE. Nejvýhodnější ze všech zkoumaných variant a scénářů je varianta rok 2023 s poskytováním dynamických služeb. Doba návratnosti je v tomto případě pouhých 20 let a RCF je zhruba 500 milionů korun. Tato varianta je tedy značně výhodná.

Z ekonomické analýzy plyne, že poskytování dynamických služeb je nutnou součástí funkce této teoretické PVE. Dá se obecně tvrdit, že při poskytování dynamických služeb je jakákoliv PVE ekonomicky výhodnější.

8. Závěr

Hlavním cílem bakalářského projektu bylo určení ekonomické efektivity teoretické PVE, popis funkce PVE a na síti a nastínění některých možných lok/alit pro výstavbu nových PVE

V první části se zabývám historií PVE v české republice, momentálně funkčními PVE, které v ČR fungují a nastiňujeme některé možné projekty a lokality pro budoucí PVE.

V druhé části je celosvětová historie PVE a jsou zde popsány největší a nejvýznamnější aktuálně pracující PVE. Dále v této kapitole rozebírám vývoj velikosti kapacity světových PVE a jak velkou kapacitu mají PVE v jednotlivých státech.

Ve třetí části, která je ze všech částí nejobšáhlejší se zabývám aktuální energetickou bilancí české rozvodné sítě a předpokládaném vývoji zdrojové základy do budoucna se zaměřením na OZE a jejich vliv. Dále se zabývám existujícími metodami akumulace elektrické energie a popisujeme jejich výhody a nevýhody. Poté se blíže zaměřujeme na akumulaci energie v PVE a popisujeme výbavu, potřebnou pro provoz PVE. Poté zkoumám výhody a nevýhody této metody akumulace energie. Nakonec zkoumám služby, které PVE v síti poskytuje, a to jak statické, tak dynamické služby.

Ve třetí části zkoumám roční výnos, který vznikne provozováním PVE. Výnos zkoumám pro různé scénáře funkce teoretické PVE Vinice-Pteč. Tato část slouží hlavně pro představu, aby bylo vidět, jakých výnosů je teoreticky možné za roky 2022 a 2023 dosáhnout. Výnosy všech variant jsou následně porovnány a jsou diskutovány možné důvody pro hodnoty, které vyšly.

Ve čtvrté části se zabývám investičními náklady, které jsou nutné pro uskutečnění takového projektu a zkoumám roční náklady spojené s provozem teoretické PVE.

A nakonec v poslední části projektu zkoumám ekonomickou efektivnost celého projektu pomocí metody RCF. Zjistil jsem, že se celý projekt vyplatí pouze, pokud by PVE poskytovala dynamické služby v nejvyšší možné míře. Bez jejich poskytování je celý projekt nevýhodný. Celkově usuzuji, že vzhledem k vývoji zdrojové základny a směřování energetické politiky, se stavba PVE Vinice-Pteč vyplatí. Odhaduji, že dynamické služby budou do budoucna více oceňovány, než v minulém roce a očekávám, že pokud nedojde k výrazně změně kurzu v české energetice bude projekt velmi prospěšný.

Seznam použité literatury

- [1] NAVAL Natalia, Jose M. YUSTA, Raul SÁNCHEZ, Fernando SEBATIÁN, Optimal scheduling and management of pumped hydro storage integrated with grid-connected renewable power plants, *Journal of Energy Storage*, Volume 73, Part B, 2023, 108993, ISSN 2352-152X
- [2] BUDÍN, Jan. Přečerpávací vodní elektrárna – princip a uspořádání. O energetice [online]. [cit. 22.11.2023]. Dostupné z: oenergetice.cz/typy-elektraren/precerpavaci-vodni-elektrarna-princip-usporadani-2
- [3] SAHOO, UMAKANTA. (2021). *Energy Storage*. John Wiley & Sons. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpES00001S/energy-storage/energy-storage>
- [4] VOŽENÍLEK, Petr, Vladimír, NOVOTNÝ, Pavel MINDL. *Elektromechanické měniče*. 2. vydání. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2011.
- [5] Zbytkový energetický mix [online]. OTE ČR, a. s. [cit. 10.11.2023] Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/zbytkovy-energeticky-mix>
- [6] Výroba elektřiny za posledních 10 dní v říjnu 2022 [online], Svaz podnikatelů pro využití energetických zdrojů, z. s. [cit. 10.11.2023]. Dostupné z: <https://www.spvez.cz/cs/aktuality/vyroba-elektriny-za-poslednich-10-dni-v-rijnu-2022>
- [7] BUFKA Aleš, Jana VEVERKOVÁ, Podíl obnovitelných zdrojů energie na hrubé konečné spotřebě energie 2010–2021 [online], Ministerstvo průmyslu a obchodu 2022 [cit. 22.11.2023]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statistika/obnovitelne-zdroje-energie/2023/1/Podil-OZE-na-hrube-konecne-spotrebe-energie-2010-2021.pdf>
- [8] CYSAŘ Jiří, Přečerpávací elektrárny mají rekord za 10 let zvedly výrobu o 70% [online], *Cysnews.cz*, [cit. 18.11.2023]. Dostupné z: <https://www.cysnews.cz/ostatni/precerpavaci-elektrarny-maji-rekord-za-10-let-zvedly-vyrobu-o-70/>
- [9] SCHWEIZTER Karel, Přečerpávací vodní elektrárny v Česku: potenciál mají Lipno i Kyjice [online], *Hybrid.cz* [cit. 20.11.2023]. Dostupné z:

<https://www.hybrid.cz/precerpavaci-vodni-elektrarny-v-cesku-skryty-potencial-maji-lipno-i-kyjice/>

[10] Přecherpávací elektrárna Dlouhé stráně vyrobila rekordní množství elektřiny [online], Hybrid.cz [cit. 20.11.2023] <https://www.hybrid.cz/precerpavaci-elektrarna-dlouhe-strane-vyrobila-rekordni-mnozstvi-elektriny/>

[11] Průměrná roční míra inflace v letech 1998–2022 [online], Český statistický úřad [cit. 20.11.2023]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/prumerna-rocni-mira-inflace-v-letech-1998-2022>

[12] Malá vodní elektrárna Černé jezero [online], ČEZ, a. s. [cit. 20.11.2023]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/obnovitelne-zdroje/voda/vodni-elektrarny/ceska-republika/cerne-jezero-58157>

[13] Malá vodní elektrárna Pastviny [online], ČEZ, a. s. [cit. 20.11.2023]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/obnovitelne-zdroje/voda/vodni-elektrarny/ceska-republika/pastviny-58146>

[14] ŠTÝS, Stanislav. Rekultivace území postižených těžbou nerostných surovin. 1. vyd. Praha: SNTL, 1981, 678 s.

[15] Přecherpávací elektrárna Dlouhé stráně [online], ČEZ, a. s. [cit. 20.11.2023]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/obnovitelne-zdroje/voda/vodni-elektrarny/ceska-republika/dlouhe-strane-58155>

[16] MAREŠ, Jaroslav, Atomový protektorát, Euromedia Group, 2022

[17] PLAVECKÝ Radek, Z Orlíku bude přecherpávací elektrárna [online], Novinky.cz [cit. 22.11.2023]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/clanek/domaci-z-orliku-bude-precerpavaci-elektrarna-40444497>

[18] VOLF Tomáš, Česko uvažuje o nových hydroelektrárnách, Novinky.cz [cit. 22.11.2023]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/clanek/domaci-cesko-uvazuje-o-novych-hydroelektrarnach-40433180>

[18] Statní energetická koncepce České republiky [online], Ministerstvo průmyslu a obchodu [cit. 22.11.2023] Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/52841/60959/636207/priloha006.pdf>

- [19] Energetický mix ČR [online], Česká společnost pro větrnou energii [cit. 22.11.2023]
Dostupné z: <https://csve.cz/cz/clanky/energeticky-mix-cr/485>
- [20] Krátkodobé trhy, Denní trh – 23. duben 2023 [online], OTE ČR, a. s. [cit. 22.11.2023].
Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/kratkodobe-trhy/elektrina/denni-trh?date=2023-04-23>
- [21] VOBOŘIL David, Přecerpávací vodní elektrárny v České republice [online],
oenergetice.cz [cit. 22.11.2023]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/precerpavaci-vodni-elektrany-v-ceske-republice>
- [22] MATOUŠEK, Antonín. Elektrárny 1. Brno: vysoké učení technické, 2002. ISBN
80-214-2269-6
- [23] BUFKA Aleš, Jana VEVERKOVÁ, Miloslav MODLÍK, Jana BLECHOVÁ-
TOURKOVÁ, Obnovitelné zdroje energie [online], Ministerstvo průmyslu a obchodu [cit.
22.11.2023]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statistika/obnovitelne-zdroje-energie/2022/11/Obnovitelne-zdroje-energie-2021.pdf>
- [24] BLAKERS Andrew, A review of pumped hydro energy storage, Progress in energy,
Volume 3, Number 2, IOP Publishing LTD, 2021
- [25] TER-GAZARIAN, Andrei G.. (2020). Energy Storage for Power Systems (3rd Edition).
Institution of Engineering and Technology (The IET). Dostupné z:
<https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpESPSE013/energy-storage-power/energy-storage-power>
- [26] WINTER Jaroslav, Propojí se Dunaj s Vltavou a nahradí tak jeden z plánovaných bloků
JE Temelín? [online], Technický týdeník [cit. 19.12.2023]. Dostupné z:
https://www.technickytydenik.cz/rubriky/energetika-teplo/propoji-se-dunaj-s-vltavou-a-nahradi-tak-jeden-z-planovanych-bloku-je-temelin_47714.html
- [27] Základní informace k vodíku [online], Česká vodíková technologická platforma [cit.
22.12.2023]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/o-vodiku/ve-zkratce>
- [28] BOUŠKA Jan, Historie energetiky [online], Svaz podnikatelů pro využití energetických
zdrojů, z. s. [cit. 22.12.2023]. Dostupné z:
<https://www.spvez.cz/cs/historie>

- [29] HOFF, C. Michael. Energy Storage Technologies and Applications, Artech House, 2022. ProQuest Ebook Central, Dostupné z:
<https://ebookcentral.proquest.com/lib/cvut/detail.action?docID=29703391>.
- [30] ROUETEE Hans-Karl. Encyclopedia of Textile Finishing - Evaporation Plant. Woodhead Publishing. Dostupné z:
<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt003VTME3/encyclopedia-textile/evaporation-plant>
- [31] KOLEKTIV AUTORŮ. Trh s elektřinou. Úvod do liberalizované energetiky. Praha: Asociace energetických manažerů, 2011
- [32] Roční zpráva - 2022 [online], OTE ČR, a. s. [cit. 26.12.2023]. Dostupné z:
<https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/rocn-zprava?date=2022-01-01>
- [33] HUŠEK, Josef. Přečerpávací vodní elektrárny. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963.
- [34] Kodex PS: Podpůrné služby (PpS). ČEPS, 2024. Dostupné z:
<https://www.ceps.cz/cs/kodex-ps>
- [35] Statistiky SVR [online], ČEPS [cit. 28.3.2024]. Dostupné z:
<https://www.ceps.cz/cs/statistiky-svr>
- [36] Analýza povodí Dunaje [online], Mezinárodní komise pro ochranu Dunaje [cit. 26.12.2023]. Dostupné z:
[https://www.mzp.cz/web/edice.nsf/D2ABB6F385B21308C125719C00312E32/\\$file/icpdr-ce-korektura_final_2.pdf](https://www.mzp.cz/web/edice.nsf/D2ABB6F385B21308C125719C00312E32/$file/icpdr-ce-korektura_final_2.pdf)
- [37] Vodní elektrárny Štěchovice [online], ČEZ, a. s. [cit. 26.12.2023] Dostupné z:
<https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/obnovitelne-zdroje/voda/vodni-elektrarny/ceska-republika/stechovice-58100>
- [38] Pumped Storage Hydropower Capabilities and Costs [online], Pumped Storage Hydropower Internacional Forum [cit. 26.12.2023]. Dostupné z:
https://assets-global.website-files.com/64f9d0036cb97160cc26feba/64f9d0036cb97160cc2712aa_IFPSH%20-%20PSH%20Capabilities%20and%20Costs_15%20Sept.pdf
- [39] Struktura mezd zaměstnanců [online] Český statistický úřad [cit. 26.12.2023]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/struktura-mezd-zamestnancu-2022>

[40] VÍTEK, Miroslav. Přečerpávací Vodní Elektrárna v Zatopeném Hnědouhelném Lomu Po Jeho Vytěžení Aneb Jedna z Variant Hydrické Rekultivace. Energetika. 2016, roč. 66, č. 1.

[41] NOVOTNÝ František, MROŽOVINY: Technický šperk v srdci Jeseníků [online], Neviditelný Pes [cit. 26.12.2023] Dostupné z:

https://web.archive.org/web/20160304185912/http://archiv.neviditelnypes.zpravy.cz/clanky/2004/07/38339_21_0_0.html

[42] KNÁPEK, Jaroslav, Oldřich STARÝ a Jiří VAŠÍČEK. Zásady hodnocení ekonomické efektivnosti energetických zdrojů. Dostupné z:

<https://web.archive.org/web/20200904092843/http://efekt.xf.cz/metodikaEFEKT.pdf>

[43] KREJČÍ, Veronika, Tiskové oddělení MŽP, Šest lokalit vhodných pro stavbu přečerpávacích elektráren. Ministři Hladík a Výborný zahájili kroky k významnému posílení akumulace elektrické energie [online]. Ministerstvo životního prostředí [cit. 19.4.2024].

Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/news_20240305_Sest-lokalit-vhodnych-pro-stavbu-precerpavacich-elektraren-Ministri-Hladik-a-Vyborny-zahajili-kroky-k-vyznamnemu-posileni-akumulace-elektricke-energie

[44] MŽP vytypovalo šest nejvhodnějších míst pro přečerpávací vodní elektrárny [online], ekolist.cz [cit. 19.4.2024]. Dostupné z: <https://ekolist.cz/cz/zpravodajstvi/zpravy/mzp-vytypovalo-sest-nejvhodnejsich-mist-pro-precerpavaci-vodni-elektrarny>

[45] Bývalé uhelné doly mohou sloužit dále – jako přečerpávací elektrárny [online], allforpower, roč 2015, č. 4. Dostupné z: <http://old.allforpower.cz/UserFiles/file/reacon.pdf>

[46] PORTUŽÁK, Roman, Přečerpávací vodní elektrárny [online], VŠB – Technická univerzita Ostrava [cit. 19.4.2024]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/12765909-Precerpavaci-vodni-elektrarny-roman-portuzak.html>

[47] HRUBÝ, Matěj, Budoucí energetický mix Česka: Pro stromy nevidíme les [online], BuisnessINFO.cz [cit. 19.4.2024], Dostupné z: <https://www.businessinfo.cz/clanky/budouci-energeticky-mix-ceska-pro-stromy-nevidime-les/>

[48] BROWN, Sarah, Dave JONES, European Electricity Review 2024 [online], EMBER [cit. 19.4.2024]. Dostupné z: <https://ember-climate.org/insights/research/european-electricity-review-2024/>

[49] Shedding light on energy in the EU – 2023 edition [online], eurostat [cit. 19.4.2023]. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/interactive-publications/energy-2023#>

- [50] DOUBEK, Jan, Dochované větrné mlýny a mlýnky v České republice, technické muzeum v Brně, 2005 [cit 20.4.2023]. Dostupné z: <http://www.povetnik.cz/upload/stories/časová%20osa.pdf>
- [51] BLAKERS, Andrew, Matthew Stocks, Bin LU, Cheng CHENG, A review of pumped hydro energy storage [online], IOP Publishing 2021 [cit. 20.4.2023]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2516-1083/abeb5b#prgeabeb5bs5>
- [52] CHOWDHURY, Tawsif Hossain, Overview of pumped storage system to produce clean energy, SEU Journal Of Electrical and Electronic Engineering, vol. 1, no. 1. Dostupné z: https://seu.edu.bd/seujeee/downloads/vol_01_issue_01_Jan_2021/SEUJEEE-Vol01Issue01-7.pdf
- [53] Rocky River Pumped Storage Hydraulic Plant [online], American Society of Civil Engineers [cit. 22.4.2024]. Dostupné z: <https://www.asce.org/about-civil-engineering/history-and-heritage/historic-landmarks/rocky-river-pumped-storage-hydraulic-plant>
- [54] Pumping power: pumped storage stations around the world [online], drax [cit. 22.4.2024]. Dostupné z: <https://www.drax.com/power-generation/pumping-power-pumped-storage-stations-around-the-world/>
- [55] AMBERG E. J., "Rocky River Hydroelectric Development Of The Connecticut Light and Power Company," in Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, vol. 47, no. 4, pp. 1100-1107, Oct. 1928, doi: 10.1109/T-AIEE.1928.5055108.
- [56] Rocky River Pumped-Storage Hydroelectric Station [online], The American Society of Mechanical Engineers [cit. 22.4.2024]. Dostupné z: <https://www.asme.org/wwwasmeorg/media/resourcefiles/aboutasme/who%20we%20are/engineering%20history/landmarks/56-rocky-river-hydroelectric-station.pdf>
- [57] Pure pumped storage hydropower capacity worldwide from 2010 to 2023 [online], statista [cit. 22.4.2024]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/1304113/pumped-storage-hydropower-capacity-worldwide/>
- [58] Capacity of pumped storage hydropower worldwide in 2023, by leading country [online], statista [cit. 22.4.2024]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/689667/pumped-storage-hydropower-capacity-worldwide-by-country/>
- [59] Fengning Pumped Storage Power Plant [online], NS ENERGY [cit. 22.4.2024]. Dostupné z: <https://www.nsenergybusiness.com/projects/fengning-pumped-storage-power-plant/>

- [60] Pumped Storage in Bath County [online], Virginia Places [cit. 22.4.2024]. Dostupné z: <http://www.virginiaplaces.org/energy/bathpumped.html>
- [61] Grand Maison Hydroelectric Power Plant [online], NS ENERGY [cit. 22.4.2024]. Dostupné z: <https://www.nsenergybusiness.com/projects/grand-maison-hydroelectric-power-plant/>
- [62] Power plant profile: Grand Maison, France [online], Power Technology [cit. 22.4.2024]. Dostupné z: <https://www.power-technology.com/data-insights/power-plant-profile-grand-maison-france/>
- [63] Dinorwig Power Station [online], NS ENERGY [cit. 23.4.2024]. Dostupné z: <https://www.nsenergybusiness.com/projects/dinorwig-power-station/>
- [64] Dinorwig Power Station [online], First Hydro Company [cit. 23.4.2024]. Dostupné z: <https://www.fhc.co.uk/en/power-stations/dinorwig-power-station/>
- [65] Dinorwig Power Station [online], ice [cit. 23.4.2024]. Dostupné z: <https://www.ice.org.uk/what-is-civil-engineering/what-do-civil-engineers-do/dinorwig-power-station>
- [66] DE OLIVIERTA E SILVA, Guilherme, Pumped storage – How small can you go?, International Water Power and Dam Construction, č. 69. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/318339112_Pumped_storage_-_How_small_can_you_go
- [67] Graf USD/Kč, ČNB, grafy kurzů měn [online], kurzycz [cit. 14.5.2023]. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/kurzy-men/?A=G&M1=K%E8&M2=USD&od=4.1.1993&do=5.8.2002&V=3> 14.5.2023
- [68] VÍTEK, Miroslav, Může vítr nahradit uhlí v energetice v energetice?, Energie 21, roč. 2022, č. 6
- [69] Vitek, Miroslav, František Šíla, Přečerpávací vodní elektrárny jako efektivní akumulace, Energie 21, roč. 2024, č.1